



## **FESI Dokument A5** ***FESI Document A5***

### **Akustik in Räumen** ***Acoustics in rooms***

Juli 2013, 1. überarbeitete Version  
*July 2013, 1<sup>st</sup> revised edition*

FESI Office:

Eiif - European Industrial Insulation Foundation  
Mr. Andreas Gürtler  
Avenue du Mont-Blanc 33  
1196 Gland, Switzerland  
Tel.: 0041 22 99 500 70  
e-mail: andreas.guertler@eiif.org



## Akustik in Räumen *Acoustics in rooms*

Inhalt	Contents
A5-0	Absicht .....4
A5-0	Intention .....4
A5-1	Einleitung .....4
A5-1	Introduction.....4
A5-2	Schallleistung in verschiedenen Räumen .....5
A5-2	Acoustic performance in different rooms .....5
A5-2.1	Allgemeines .....5
A5-2.1	General .....5
A5-2.2	Nachhall .....5
A5-2.2	Reverberation .....5
A5-2.2.1	Allgemeines .....5
A5-2.2.1	General .....5
A5-2.2.2	Eigenschaft des Nachhalls.....6
A5-2.2.2	Nature of reverberation .....6
A5-2.2.3	Nachhallzeit .....7
A5-2.2.3	Reverberation time .....7
A5-2.2.4	Messung der Nachhallzeit (T) .....7
A5-2.2.4	Measuring of reverberation time (T) .....7
A5-2.2.5	Berechnung und Vorhersage der Nachhallzeit .....10
A5-2.2.5	Calculation and prediction of reverberation time .....10
A5-2.3	Sprachverständlichkeit .....12
A5-2.3	Speech intelligibility .....12
A5-2.3.1	Allgemeines .....12
A5-2.3.1	General .....12
A5-2.3.2	Indizes für die Bestimmung der Sprachverständlichkeit .....14
A5-2.3.2	Indices for the determination of speech intelligibility .....14
A5-2.4	Schallausbreitung in Räumen .....18
A5-2.4	Sound propagation in rooms .....18
A5-2.4.1	Allgemeines .....18
A5-2.4.1	General .....18
A5-2.4.2	Schallausbreitung in kubischen Räumen (Diffusfeldbedingungen) .....19
A5-2.4.2	Sound propagation in cubical rooms (diffuse field conditions) .....19
A5-2.4.3	Schallausbreitung in flachen Räumen .....19
A5-2.4.3	Sound propagation in flat rooms .....19
A5-2.4.4	Schallausbreitung in langen Räumen .....22
A5-2.4.4	Sound propagation in long rooms .....22
A5-2.4.5	Komplexe Situationen .....23
A5-2.4.5	Complex situations .....23
A5-2.4.6	Eigenformen und Eigenfrequenzen in Räumen .....23
A5-2.4.6	Natural modes and natural frequencies in rooms .....23
A5-2.4.7	Schalldiffusion .....24
A5-2.4.7	Sound diffusion .....24
A5-2.4.8	Echos .....25
A5-2.4.8	Echoes .....25
A5-2.4.9	Akustische Konsequenzen der Raumgeometrie .....26
A5-2.4.9	Acoustical consequences of the room geometry .....26
A5-2.5	Hintergrundgeräusch .....28
A5-2.5	Background noise .....28
A5-2.5.1	Allgemeines .....28
A5-2.5.1	General .....28
A5-2.5.2	Balanced Noise Criterion (NCB)-Kurven .....28
A5-2.5.2	Balanced Noise Criterion (NCB) curves .....28
A5-2.5.3	Noise Rating (NR)-Kurven .....30
A5-2.5.3	Noise Rating (NR) curves .....30
A5-2.6	Andere akustische Parameter .....32
A5-2.6	Other acoustic parameters .....32
A5-2.6.1	Allgemeines .....32
A5-2.6.1	General .....32
A5-2.6.2	Klarheitskriterien .....33
A5-2.6.2	Clarity criteria .....33
A5-2.6.3	Räumlichkeitskriterien .....34
A5-2.6.3	Spaciousness criteria .....34
A5-2.6.4	Harmonie- und Gleichmäßigkeitskriterien .....35
A5-2.6.4	Harmony and homogeneity criteria .....35
A5-2.6.5	Kriterien für die Bühne .....35
A5-2.6.5	Criteria for the stage .....35
A5-3	Schlüsselparameter für verschiedene Räume .....36
A5-3	Key parameters for different rooms .....36
A5-3.1	Allgemeines .....36
A5-3.1	General .....36
A5-3.2	Büros .....36
A5-3.2	Offices .....36

A5-3.2.1	Geschlossene Einzel- oder Gemeinschaftsbüros - Allgemeines	37
A5-3.2.1	Closed individual or collective offices – General	37
A5-3.2.2	Anforderungen und Empfehlungen	38
A5-3.2.2	Requirements and recommendations	38
A5-3.2.3	Berechnung	39
A5-3.2.3	Calculation	39
A5-3.3	Klassenräume / Kindergärten	41
A5-3.3	Classrooms / Kindergarten	41
A5-3.3.1	Allgemeines	41
A5-3.3.1	General	41
A5-3.3.2	Anforderungen und Empfehlungen	42
A5-3.3.2	Requirements and recommendations	42
A5-3.3.3	Berechnung	43
A5-3.3.3	Calculation	43
A5-3.4	Arbeitsräume	46
A5-3.4	Workshops	46
A5-3.4.1	Allgemeines	46
A5-3.4.1	General	46
A5-3.4.2	Anforderungen und Empfehlungen	47
A5-3.4.2	Requirements and recommendations	47
A5-3.4.3	Abwicklung von Lärminderung (Lärmschutz)	49
A5-3.4.3	Dealing with noise reduction (noise control)	49
A5-3.5	Sitzungsräume	53
A5-3.5	Meeting rooms	53
A5-3.5.1	Allgemeines	53
A5-3.5.1	General	53
A5-3.5.2	Anforderungen und Empfehlungen	54
A5-3.5.2	Requirements and recommendations	54
A5-3.5.3	Berechnungen	54
A5-3.5.3	Calculations	54
A5-3.6	Sporträume und Turnhallen	58
A5-3.6	Sport rooms and gym halls	58
A5-3.6.1	Allgemeines	58
A5-3.6.1	General	58
A5-3.6.2	Anforderungen und Empfehlungen	59
A5-3.6.2	Requirements and recommendations	59
A5-3.7	Große Räume / Öffentliche Räume	59
A5-3.7	Large-scale rooms / public spaces	59
A5-3.7.1	Großraumbüros – Offene Räume	59
A5-3.7.1	Large office halls – open spaces	59
A5-3.7.2	Restaurants	63
A5-3.7.2	Restaurants	63
A5-3.8	Große Auditorien / Konzertsäle / Opernhäuser	65
A5-3.8	Large auditoria / concert halls / operas	65
A5-3.8.1	Allgemeines	65
A5-3.8.1	General	65
A5-3.8.2	Anforderungen und Empfehlungen	66
A5-3.8.2	Requirements and recommendations	66
A5-3.9	Mehrzweckräume	66
A5-3.9	Multi-purpose rooms	66
A5-3.9.1	Allgemeines	66
A5-3.9.1	General	66
A5-3.9.2	Anforderungen und Empfehlungen	67
A5-3.9.2	Requirements and recommendations	67
A5-3.10	Fernseh- / Musikaufnahmestudios	68
A5-3.10	Television / music recording studios	68
A5-3.11	Kinos	77
A5-3.11	Cinemas	77
A5-3.12	Räume mit besonderen akustischen Anforderungen	78
A5-3.12	Rooms with special acoustic requirements	78
A5-3.13	Räume mit hygienischen Anforderungen	82
A5-3.13	Rooms with hygienic requirements	82
A5-4	Verbesserung der akustischen Eigenschaften bestehender Räume: Messungen und Modellerstellung	83
A5-4	Improvement of acoustical characteristics of existing rooms: Measurements and modelling	83
A5-4.1	Allgemeines	83
A5-4.1	General	83
A5-4.2	Messungen	83
A5-4.2	Measurements	83
A5-4.2.1	Messungen, wenn es nötig ist, bestehende Räume zu verbessern	83
A5-4.2.1	Measurements when it is necessary to improve existing rooms	83
A5-4.2.2	Messungen in neuen Räumen	84
A5-4.2.2	Measurements in case of new rooms	84
A5-4.3	Modellerstellung	85
A5-4.3	Modelling	85
A5-4.4	Akustische Konditionierung	85
A5-4.4	Acoustic conditioning	85
A5-5	Symbole und Einheiten	86
A5-5	Symbols and units	86

	A5-6Normen	und	Literatur
A5-6	89		
	Standards and literature .....		89

**Anlage**

**Annex**

**Absorptionscharakteristika verschiedener Elemente**

**Absorption characteristics of different elements**

<b>A5-0 Absicht</b>	<b>A5-0 Intention</b>
<p>Das FESI Dokument A5 „Akustik in Räumen“ gehört zu einer Serie von sechs Dokumenten zu schalltechnischen Problemstellungen und deren Lösungen.</p>	<p>The FESI Document A3 “Acoustics in rooms” is one of a series of six papers on acoustical problems together with their solutions.</p>
<p>Die benutzte Terminologie wurde bei CEN in enger Zusammenarbeit mit dem akustischen Technischen Komitee TC 126 entlehnt.</p>	<p>The terminology used has been taken from CEN in close cooperation with the acoustical Technical Committee TC 126.</p>
<p>Die gesamte Gruppe von akustischen Dokumenten wird folgende Titel umfassen:</p>	<p>The total block of acoustical documents will comprise the following titles:</p>
<p>A2 „Grundlagen der Akustik“ – 4. überarbeitete Auflage, Juli 2013</p>	<p>A2 “Basics of acoustics” – Rev.4, July 2013</p>
<p>A3 „Eigenschaften von Baustoffen – Schalldämmung, Absorption, Dämpfung“ – 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013</p>	<p>A3 “Product characteristics – Acoustic insulation, absorption, attenuation” – Rev.1, July 2013</p>
<p>A4 „Gebäudeakustik“ - 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013</p>	<p>A4 “Acoustics in buildings” – Rev.1, July 2013</p>
<p>A5 „Akustik in Räumen“ - 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013</p>	<p>A5 “Acoustics in rooms” – Rev.1, July 2013</p>
<p>A6 „Akustik in der Industrie“ – 3. überarbeitete Auflage, Juli 2013</p>	<p>A6 “Industrial acoustics” – Rev. 3, July 2013</p>
<p>A7 “Guidance through FESI Documents A2 through A6” - 1. überarbeitete Auflage, Juli 2013</p>	<p>A7 “Guidance through FESI Documents A2 through A6” - Rev.1, July 2013</p>
<b>A5-1 Einleitung</b>	<b>A5-1 Introduction</b>
<p>Die betrachteten Räume können sehr unterschiedlich sein und sehr unterschiedliche erwünschte akustische Eigenschaften aufweisen, abhängig von der Art der vorgesehenen Nutzung und der Größe der Stätte.</p>	<p>The rooms under consideration could be very different, with very different desired acoustic characteristics dependent upon the nature of the activities foreseen and the size of the location.</p>
<p>Man kann zwei große Hauptkategorien unterscheiden:</p>	<p>One could distinguish between two great categories of rooms:</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- solche, die ohne die Notwendigkeit behandelt werden können, besonders genaue akustische Leistungen zu erzielen, wie z. B. in Büros, Klassenräumen, Sitzungsräumen, ...</li> <li>- und solche, die in besonders exakter Weise gestaltet werden müssen, da die Zufriedenheit der Benutzer von der Qualität der Schallerzeugung und der Möglichkeit zu hören abhängt. Dies betrifft Räume für Vorführungen, Auditorien, Theater, Opernhäuser, aber auch Aufnahmestudios und auch Räume für akustische Prüfungen, reflexionsarme Räume und Hallräume.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- those that need to be treated without it being necessary to obtain very precise acoustic performances, such as offices, classrooms, meeting rooms, ...</li> <li>- and those that need to be treated in a very precise fashion because the satisfaction of users will depend on the quality of sound production and the possibility to listen. This concerns rooms for demonstrations, auditoriums, theatres, operas, but also recording studios and even rooms for acoustical tests, dead rooms or reverberation rooms.</li> </ul>
<p>Die Untersuchung und Umsetzung der schalltechnischen Behandlung von Räumen der ersten Kategorie kann durch Spezialfirmen vorgenommen werden, die über Personal mit akustischen Grundkenntnissen verfügen. In diesem Dokument sind die Grundlagen der Behandlung und die notwendigen Werkzeuge für ihre Bestimmung dargestellt.</p>	<p>The study and realisation of acoustical treatment of rooms of the first category could be made by a specialised company having personnel of a basic knowledge in acoustics available. In this document, we give the principles of treatment and the necessary tools for their determination.</p>
<p>Bezüglich der Räume der zweiten Kategorie ist es klug, sich an Spezialisten zu wenden. Und in diesem Dokument werden die zu benutzenden Entscheidungskriterien mit dem Ziel behandelt, dass spezialisierte Firmen in der Lage sein werden zu verstehen, was von ihnen verlangt wird.</p>	<p>Regarding the rooms of the second category, it is prudent to address a specialist. In this document we address the decision criteria to be used with a view that specialised companies may be able to understand what is demanded of them.</p>
<p>Raumakustik ist keine exakte Wissenschaft. Wenn man bedenkt, dass ein Raum von der Person eingeschätzt wird, die ihn benutzt, erkennt man, dass man sofort in den Bereich der Subjektivität eindringt. Es gibt bestimmte Kriterien, die man kennen und untersuchen muss, relative Entwicklungen, die beachtet werden müssen, aber die Ergebnisse, die durch diese Kriterien erzielt werden können, haben stets nur hinweisenden Charakter.</p>	<p>Acoustics in rooms is not an exact science. If one considers that a room will be appreciated by an individual who is using it, one realises that one immediately enters into an area of subjectivity. There are certain criteria to be known and to be studied, relative developments to be respected, but the values to be obtained by these criteria are always of an individual nature.</p>

Um die akustische Qualität eines Raumes zu realisieren, benutzt man, unabhängig von der Art des Raumes, die Eigenschaften von Absorption, Reflexion und Diffusion der Materialien. Leider sind diese Eigenschaften nicht besonders gut bekannt: Zum Beispiel wird der Absorptionsgrad eines Produkts in einem Hallraum unter Benutzung einer Formel gemessen, die für die gemessene Konstellation nicht anwendbar zu sein braucht. Trotzdem genügen in der Mehrheit der betrachteten Fragen, die man von Laboratorien erhält, in Anbetracht der angestrebten Genauigkeit der Ergebnisse. Andererseits, im Fall der Notwendigkeit exakter Ergebnisse, ist es nützlich, eine erste Maßnahme umzusetzen, eine Messung der Ergebnisse und eine Anpassung der Maßnahme unter Benutzung der Messergebnisse durchzuführen.

Schließlich behandelt dieses Dokument keine elektronischen Systeme (Lautsprecher, elektroakustische Ketten, usw.).

## **A5-2 Schalleistung in verschiedenen Räumen**

### **A5-2.1 Allgemeines**

Die Eigenschaft des akustischen Feldes in einer Kapsel oder einem Raum steht in unmittelbarem Bezug zu den Abmessungen des Raumes. Die umgebenden Flächen spielen eine bedeutende Rolle in dem Prozess der Abstrahlung und Aufnahme von Schall. Die theoretischen Untersuchungen des akustischen Feldes basieren auf den nachfolgend beschriebenen Theorien.

Daneben gilt es ebenfalls, die psychoakustischen Theorien zu berücksichtigen, welche sich mit den subjektiven Empfindungen beschäftigen, anstatt mit dem theoretischen akustischen Verhalten eines Raumes.

#### Statistische Theorie

Sie betrachtet die Geräusche (Sprache und Musik), die innerhalb eines Raumes erzeugt werden, wie auch die Phasen der Wellen, die von den Schallquellen als zufällige und unregelmäßige Signale abgestrahlt werden. Diese Theorie deckt nicht die eigentlichen physikalischen Einzelheiten dieser Phänomene auf, erlaubt jedoch mit einigen empirischen und einfachen mathematischen Überlegungen zu objektiven Schlussfolgerungen zu gelangen. Die wesentlichen Begriffe, die diese Theorie benutzt, sind: Nachhallzeit und Schallenergiedichte.

#### Geometrische Theorie

Das Schallfeld wird als eine Kombination von Strahlen angesehen, die den Gesetzen der optischen Geometrie folgen. Diese Theorie ist anwendbar, wenn die inneren Oberflächen mit Material mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften bedeckt sind. Das akustische Feld wird mittels der Schallenergie betrachtet, die man in jedem Punkt von den Strahlen erhält, die, nachdem sie reflektiert wurden, durch diesen Punkt hindurchgehen. Bei tiefen Frequenzen gibt diese Theorie nur Ergebnisse von begrenzter Genauigkeit.

#### Wellentheorie

Diese Theorie basiert auf der Tatsache, dass sich der leere Bereich innerhalb eines Raumes wie ein schwingungsfähiges System verhält, welches durch das Signal der Schallquelle angeregt wird. Es wird die Theorie der Wellen und Moden benutzt.

In diesem Dokument, welches praktisch und bildhaft sein möchte, werden die Konzepte und Parameter aller früheren Theorien benutzt, ohne jedoch irgendeine von ihnen besonders zu bevorzugen.

## **A5-2.2 Nachhall**

### **A5-2.2.1 Allgemeines**

Der Nachhall wird traditionell als wichtigster Parameter bei der Beschreibung der akustischen Qualität eines Raumes betrachtet. In der Tat war er der einzige Parameter, der bis in die 60er, 70er Jahre des 20. Jahrhunderts hinein benutzt wurde.

To realise the acoustic quality of a room, regardless of its nature, one uses the characteristics of absorption, reflection and diffusion of the materials. However, these characteristics are not very well known: For example, the absorption coefficient of a product is measured in a reverberation room by using a formula which need not be applicable for the configuration measured. Nevertheless, in the majority of questions under consideration the values given by laboratories are sufficient, considering the desired precision of the results. On the other hand, in case of need for precise results, it is useful to foresee an initial treatment, a measurement of the results and an adaptation by a treatment using the results of that measurement.

This document does not treat electronic systems (loudspeakers, chain electro-acoustics, etc.).

## **A5-2 Acoustic performance in different rooms**

### **A5-2.1 General**

The characteristic of the acoustic field inside an enclosure or room is intimately related to the dimensions of that room. The surrounding surfaces play an important role in the processes of radiation and reception of the sound. The theoretical studies of the acoustic field are based on the theories that are described below.

Besides, it is also necessary to keep in mind the psycho-acoustic theories that consider the subjective sensation instead of the theoretical acoustical performance of a room.

#### Statistical theory

It considers the sounds (speech and music) produced inside the room, as well as the phases of the waves radiated by the sound sources, as random and irregular signals. This method does not discover the intrinsic physical details of the phenomenon, although with some empirical and simple math, permits to obtain objective conclusions. The fundamental concepts used by this theory are: reverberation time and acoustic energy density.

#### Geometric theory

The sound field is considered a combination of rays, based on the laws of optical geometry. This theory applies when the interior surfaces are covered with materials of different absorption characteristics. The acoustic field is studied by means of the acoustic energy obtained in any point from the rays that after being reflected, pass through that point. At low frequencies, this theory renders results of limited accuracy only.

#### Wave theory

This theory is based on the fact that the empty space inside a room behaves as a vibratory system, this is excited by the signal from the sound source. It utilises the theory of waves and modes.

In this document, that intends to be practical and descriptive, concepts and parameters of all the previous theories will be used, but without focusing on any of them in particular.

## **A5-2.2 Reverberation**

### **A5-2.2.1 General**

Reverberation time has traditionally been considered the most important parameter in order to characterise the acoustic quality of a room. In fact, it was the only parameter used until the 60 – 70's of the twentieth century.

Obwohl es eine Reihe von akustischen Parametern gibt, die aus den Fortschritten resultieren, die in den Feldern wie der Raumakustik und Psychoakustik und speziell in Räumen mit hohen akustischen Anforderungen (Auditorien) gemacht worden sind, ist die Nachhallzeit immer noch ein Merkmal von elementarer Wichtigkeit.

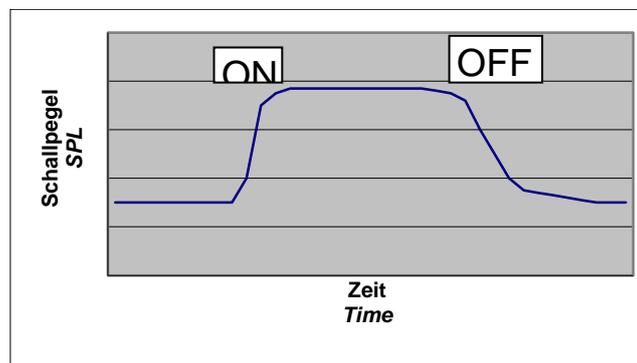
Die Nachhallzeit (T) erlaubt es, die Akzeptanz für einen Raum abzuschätzen, insbesondere für Auditorien und Musik- oder Hörsäle; dasselbe gilt für die Sprachverständlichkeit in einem vorgegebenen Raum.

Das physikalische Konzept der Nachhallzeit wird zunächst erläutert und dann befassen wir uns mit ihrer Berechnung und Messung.

Bei der Betrachtung eines Raumes, in dem ein Geräusch erzeugt wird und einen Hörer erreicht, können verschiedene lange Wege von der Quelle zum Hörer betrachtet werden. Das Geräusch erreicht den Hörer direkt (nach einer Zeit  $t$  nach der Abstrahlung), aber auch indirekt über Reflexionen von den Wänden, Böden und Decken (nach den Zeiten  $t + \Delta t_1$ ,  $t + \Delta t_2$  ... in Abhängigkeit des Weges, den der reflektierte Schall zurückgelegt hat, bevor er den Hörer erreicht). Das bedeutet, dass der Schall Schritt für Schritt am Ort des Hörers eintrifft, bis ein vollständig stationärer Schallpegel erreicht ist.

Ebenso wird zunächst der direkte Schall verschwinden, wenn die Schallabstrahlung endet, weil die Quelle abgeschaltet wird, gefolgt von dem Reflexionsschall.

Der endgültige Schall trifft ein (und endet) tatsächlich kontinuierlich, da es viele Wege von der Quelle zum Hörer gibt. Die folgende Grafik zeigt in einer realistischen Art und Weise, wie ein Geräuschpegel in einem Raum erreicht wird, wenn man eine stationäre Quelle anschaltet (ON) und wie er wieder endet, wenn die Quelle abgeschaltet wird (OFF).



**Bild 1: Änderung des Schalldruckpegels (SPL) mit der Zeit, nach dem eine Schallquelle beginnt (ON) oder endet (OFF)**

Although there are a number of acoustic parameters resulting from the advances performed in fields such as room acoustics and psycho-acoustics, and specially in rooms with high acoustic performance (auditoria), reverberation time is still a parameter of primary importance.

Reverberation time (T) allows us to assess the acceptability of a room, in particular auditoria and halls for music or lectures; and also the intelligibility of a speech in a given room.

The physical concept of reverberation time is first discussed and then we will approach its calculation and measurement.

Let us consider a room where a noise is produced and reaches a receiver. Paths of different length can be considered from the source to the receiver. Noise will reach the receiver directly (at time  $t$  after it has been emitted), but also indirectly after reflections at walls, floors and ceiling (at times  $t + \Delta t_1$ ,  $t + \Delta t_2$  ... depending on the distance travelled by the reflected noise before reaching the receiver). This means that sound will arrive step by step at the receiver's location until the total stationary sound level is attained.

Also, when noise emission ends once the source is turned off, direct noise will vanish first, followed by the reflected noise.

Actually, the final sound arrives (and ends) continuously since there are many paths from the source to the receiver. The following figure shows in a realistic way how a noise level is reached by turning on a stationary source (ON) and ends when the source is shut off (OFF) in a room.

**Figure 1: Sound pressure level (SPL) variation with the time, when a sound source starts (ON) or stops (OFF)**

#### A5-2.2.2 Eigenschaft des Nachhalls

Nachdem sich ein stationäres Schallfeld gebildet hat, besteht der von einem Mikrophon aufgenommene Schall aus direktem und indirektem Schall. Der direkte Schall ist derselbe wie im Freien oder in einem reflexionsarmen Raum. Der indirekte Schall resultiert aus all den verschiedenen Nicht-Freifeld-Bedingungen, die den abgeschlossenen Bereich charakterisieren. Diese Effekte sind typisch für einen besonderen Raum und können als „Raumantwort“ bezeichnet werden.

Es gibt drei Arten von indirektem Schall bzw. bestimmenden Faktoren:

- Der indirekte Schall, der nach dem direkten Schall eintrifft, als Ergebnis einer Reihe von Reflexionen der Raumboflächen. Dies dauert eine bestimmte Zeit wegen der verschiedenen zurückzulegenden Weglängen.

#### A5-2.2.2 Nature of reverberation

Once a stationary sound field is formed, sound picked up by a microphone consists of both direct and indirect sound. The direct sound is the same as would exist in the open or in an anechoic chamber. The indirect sound is the sound that results from all the various non-free field effects characteristic for an enclosed space. These effects are unique to a particular room, and may be called "room response".

There are three kinds of indirect sound, or factors involved:

- The indirect sound that arrives after the direct sound has arrived, as a set of reflections from room surfaces. These are spread out in time because of the different path lengths travelled.

- b) Raumresonanzen. Diese treten besonders im tiefen Frequenzbereich auf, wenn die Wellenlängen des Schalls den Raumabmessungen vergleichbar sind. Das Strahlungskonzept taugt für höhere Frequenzen und ihre kürzeren Wellenlängen. Zwischen 300 Hz und 500 Hz liegt der Übergangsbereich.
- c) Benutzte Baustoffe (Türen, Fenster, Wände, Böden). Diese werden durch den Schall von der Quelle zu Vibrationen angeregt und der Schall, der durch diese Vibrationen erzeugt wird, klingt nach jeweils typischen Raten, wenn die Anregung aufhört, ab.
- b) Room resonances. The predominantly occur in the low frequency region, when the wavelengths of the sound are comparable to the room dimensions. The ray concept works for higher frequencies and their shorter wavelengths. Around 300 Hz to 500 Hz is a transition zone.
- c) Materials of construction (doors, windows, walls, floors). They are set into vibration by the sound from the source, and this sound produced by these vibrations decays at its own particular rate when excitation is removed.

Da der Nachhall eine Kombination aller drei Typen indirekten Schalls ist – wobei c) oben deutlich der schwächste und am wenigsten wichtige ist –, kann eine Messung der Nachhallzeit die einzelnen Komponenten nicht auseinander halten. Darin liegt die Schwäche der Nachhallzeit als ein Indikator für die Raumqualität. Deswegen bezeichnet man die Nachhallzeit als *einen* Indikator für die akustischen Bedingungen eines Raumes, jedoch nicht als den einzigen (obwohl er in den meisten Fällen die Wichtigste ist).

### A5-2.2.3 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit (T) wird als die Zeit definiert, die ein Signal in einem Raum benötigt, um nach dem Abschalten der Quelle um 60 dB abzufallen (eine Änderung der Schallenergie von 1 Million und des Schalldrucks von 1000). Als Hörempfindung ausgedrückt, ist es die Zeit, in der ein als sehr laut empfundener Schall bis zur Unhörbarkeit abfällt.

Das linke Bild zeigt die theoretische Bestimmung der Nachhallzeit.

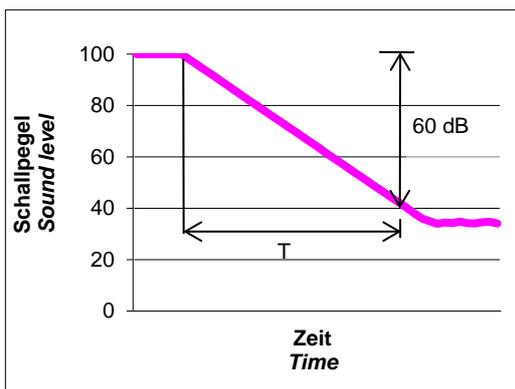


Bild 2: Bestimmung und Verlauf der Nachhallzeit

In der Praxis ist die tatsächliche Situation meistens wie im rechten Bild gezeigt. Es ist erforderlich, den direkten Anteil des Abfalls zu extrapolieren, um T abzuschätzen.

### A5-2.2.4 Messung der Nachhallzeit (T)

Es ist möglich, T gemäß verschiedener Formeln und Informationen über absorbierendes Material zu berechnen. Jedenfalls ist die Messung von T, selbst wenn sie nicht leicht zu bewerkstelligen ist, genauer als die Berechnung. Dies liegt an der Unsicherheit der Absorptionskoeffizienten der Materialien und an der Komplexität des Nachhallvorgangs.

Trotz der fortgesetzten Benutzung des Nachhalls zur Beschreibung der Raumakustik haben bisher wenige Untersuchungen seine Abhängigkeit von bestimmten Messmethoden betrachtet und beträchtliche weitere Forschungen sind nötig. Zum Beispiel haben manche Studien Differenzen von bis zu 20 % bei der Nachhallzeit gemessen, je nach dem was für Mikrofone benutzt wurden. Dies zeigt, dass selbst Messungen mit beträchtlichen Unsicherheiten belastet sind.

### A5-2.2.3 Reverberation time

Reverberation time (T) is defined as the time required for the sound in a room to decay 60 dB (a change in sound power of 1 million, and in sound pressure of 1000) from the moment the source is stopped. In terms of hearing sensation, it shows the time required for a sound that is very loud to decay to inaudibility.

The following left figure shows the theoretical determination of reverberation time

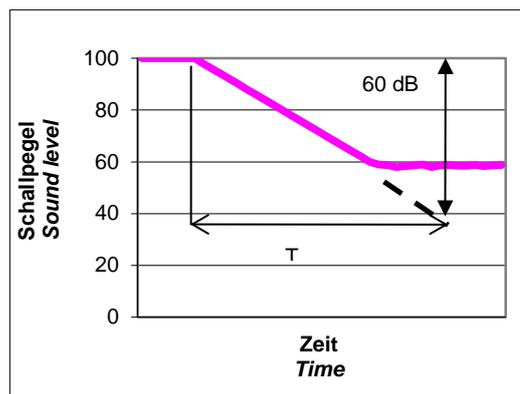


Figure 2: Determination and process of reverberation time

In practice, the real situation is mostly the one shown in the right figure. It is necessary to extrapolate the straight portion of the decay to evaluate T.

### A5-2.2.4 Measuring of reverberation time (T)

It is possible to calculate T according to various formulae and information on absorption materials. Anyway, the measurement of T, even if not very easy to make, is more accurate than calculation, due to the uncertainty in the absorption coefficients of the materials and the complexity of the reverberation process.

Despite the continued use of reverberation to characterise the acoustics of rooms, few studies have examined its dependence on a particular method of measurements, and a lot of investigation still needs to be done. For instance, some studies have detected differences of up to 20% in reverberation time measured, depending on the microphones used. This shows that even measurements are burdened with uncertainties.

Um eine Nachhallzeit zu messen, ist es erforderlich, den Raum anzuregen. Außerdem muss die Schallquelle genug Energie über das gesamte zu betrachtende Frequenzspektrum aufweisen, damit sichergestellt ist, dass der Abfall deutlich über dem Hintergrundgeräusch liegt. Für große Räume können alle möglichen Impulsquellen benutzt werden, sehr verbreitet ist die Benutzung von einer Pistole mit Platzpatronen. Für kleine Räume ist es möglich, T mit einem stationären Erreger zu erhalten: eine Schallquelle, die weißes oder rosa Rauschen abstrahlt. Außerdem sind zwei Methoden zur Anregung von Räumen verfügbar: Breitband- oder Impulsantwort.

In der traditionellen Messung wird eine Breitbandquelle benutzt und nach Abschalten der Quelle wird die Abfallkurve aufgenommen. Allerdings kann diese Kurve deutliche Variationen wegen des stochastischen Charakters des Anregungssignals aufweisen, es sollten daher mehrere Kurven an jeder Position ausgewertet werden.

Eine andere gebräuchliche Methode ist ein Pistolenschuss als anregendes Signal. Mit dieser Methode wird die Impulsantwort des Raumes gemessen. Eine bedeutende Eigenschaft dieser Methode ist, dass es dort keine stochastischen Fluktuationen gibt, so dass eine Anregung für jede Position innerhalb des Raumes ausreicht, um eine Abfallkurve zu erhalten.

Es gibt andere Spezialmethoden, die gelegentlich benutzt werden. Sie liegen außerhalb des Umfangs dieses Dokuments.

In der Praxis ist es selten möglich, den gesamten 60 dB-Abfall zu realisieren. Üblicherweise bekommt man 45 dB bis 50 dB Abfälle oder sogar noch geringere.

Um eine gute Messung für T zu erreichen, sollten alle Moden des Raumes angeregt werden. In manchen Fällen ist dieses möglich (z. B. in einem gleichmäßigen rechteckigen Raum), aber in den meisten Situationen, für die üblichen Berechnungen, ist dies kein realistischer Ansatz.

Da es wesentliche Änderungen der Nachhallzeit gibt, abhängig von der Position der Mikrofone, muss man an verschiedenen Positionen Messungen durchführen und dann den Durchschnittswert der Messungen benutzen.

Bei der Messung von T sind die größten Abweichungen im tiefen Frequenzbereich (63 Hz, 125 Hz), und die geringsten bei hohen Frequenzen (4 kHz bis 8 kHz). Dies liegt an der Tatsache, dass im hohen Frequenzbereich eine statistische Glättung der großen Anzahl üblicher Moden stattfindet.

Für die Messung der Nachhallzeit ist es wichtig, genau zu wissen, wie die Ausrüstung und die benutzte Software arbeiten.

Es gibt eine ISO-Norm für die Messung von T: ISO 3382 (eine Aktualisierung dieser Norm ist für 2006 vorgesehen).

Nachstehend werden einige Ideen auf der Basis dieser Norm wiedergegeben. Dies kann die Messung von T in praktischen Fällen erleichtern. Für schwierige und komplexe Situationen (Auditorien, Spezialräume (reflexionsarme Räume), ...) ist die Arbeit von Spezialisten zu erledigen.

Die Norm sieht Messungen der Nachhallzeit T auch als Empfehlungen für den Lärmschutz in geschlossenen Räumen und in Musik- / Sprachauditorien vor. Allerdings sind diese nicht auf Laboratorien oder Hallräume anwendbar.

Die Nachhallzeit T wird bestimmt durch die Steigung der besten linearen Annäherung an die tatsächlich gemessene Kurve zwischen 5 dB und 35 dB unterhalb des Maximalpegels (in einigen Dokumenten und in der Literatur werden auch 25 dB anstelle von 35 dB angegeben).

Ferner muss die Anzahl der Personen im Raum bekannt sein, zusammen mit Eigenschaften wie dem Vorhandensein von Vorhängen und ob der Orchestergraben geschlossen oder offen ist. Die Anwesenheit einer reflektierenden Schale muss ebenfalls betrachtet werden.

To measure the reverberation time it is necessary to excite the room. Then, the sound source must have enough energy throughout the frequency spectrum considered to assure decays sufficiently above the background noise. For large spaces, all kinds of impulse sources have been used, very commonly used is a pistol firing blank ammunition. For small rooms, it is possible to obtain T with a steady-state exciter: a noise source giving random noise (white or pink). Then, two methods of exciting rooms are available: broad-band or impulse response.

In the traditional method a broad-band noise source is used, and after the source has been switched off, the decay curve can be recorded. However, this curve can have strong fluctuations due to the stochastic character of the excitation noise, and several decay curves should be evaluated in each position.

Another traditional method is the use of a pistol shot as an excitation signal. By this method the impulse response of the room is measured. One major quality of this method is that there will be stochastic fluctuations, so one excitation in each position will be sufficient to get a decay curve.

There are other special methods, occasionally used, outside the scope of this document.

In practice, it is rarely possible to realise the entire 60 dB decay, it is more usual to get 45 dB to 50 dB decays, or even lower ones.

In order to make a good measurement of T, all the modes of the room should be excited. In some cases this is possible (e. g. in a regular rectangular room), but in most situations, for the usual calculations, this is not a realistic approach.

As there are important variations of reverberation time dependent on the position of the microphones, it is necessary to take measurements at several positions, and to use the average of those measurements.

Measuring T, the greatest fluctuations are in the lower bands (63 Hz, 125 Hz), and the least in the highest one (4 kHz to 8 kHz), due to the fact that in the high bands there is a statistical smoothing of the great number of normal modes included.

It is important for measuring the reverberation time to know how the equipment and the software used work.

There is one ISO standard regarding to T measurement: ISO 3382 (an update of this standard is expected during 2006).

Below, some ideas based on that standard are given. This can help to measure T in practical cases. For difficult and complex situations (auditoria, special rooms (anechoic), ...) the job has to be done by specialists.

The standard provides reverberation time T measurements as well as recommendations for noise control in enclosed spaces and music / speech auditoria. However, these do not apply to laboratories or reverberant chambers.

Reverberation time T determined by the slope of the best linear fit of the real curve measured between 5 dB and 35 dB below the maximum level (in some documents and bibliography, 25 dB instead of 35 dB are given).

Furthermore, the number of occupants of the hall has to be known, together with features like the presence of curtains and if the orchestra pit is closed or opened. The existence of a reflecting shell must also be considered.

Um die Absorption der Umgebung mit einzubeziehen, müssen Temperatur und relative Feuchte gemessen werden und zwar mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  und  $\pm 5\%$ .

In der Norm können Spezifikationen über Schallquellen und vorgeschlagene Mikrofone und Filter gefunden werden, in Übereinstimmung mit den üblichen Standards und abhängig von verschiedenen Aspekten.

Es müssen genug Messpositionen ausgewählt werden, um den ganzen Raum abzudecken und den Einfluss von Direktschall mit einem Mindestabstand zwischen Quelle und Mikrofon zu vermeiden, der durch den folgenden Ausdruck beschrieben wird:

$$d_{\min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{cT}} \quad [1]$$

wobei V das Raumvolumen in  $\text{m}^3$ , c die Schallgeschwindigkeit in m/s und T die Nachhallzeit in s ist.

In kleinen Räumen, in denen die vorangegangene Anforderung nicht erfüllt werden kann, muss eine Schallabschirmung mit vernachlässigbarer Absorption zwischen Quelle und Mikrofon angebracht werden.

Bezüglich der Anregung des Raumes sind zwei Methoden anerkannt: das *Verfahren des abgeschalteten Rauschens* und das *Verfahren der Impulsantwort*. Sie entsprechen den beiden früher erwähnten Methoden (mit Schallquelle / mit Impulsquelle).

Die Norm empfiehlt, in Konzertsälen oder Vortragsräumen die Frequenzen in Oktaven zwischen 63 Hz und 4 kHz zu messen und in Räumen für andere Zwecke in Terzen zwischen 100 Hz und 5 kHz. Modernes Gerät erlaubt in jedem Fall Oktavmessungen, die leichter sind.

#### Messung kurzer Nachhallzeiten, weniger als 0,3 Sekunden

Für bestimmte Räume (Hör- und Aufnahmestudios, Räume für Videokonferenzen, Radio- und Fernsehkontrollräume) ist die Nachhallzeit zu kurz, um in Terzbändern mit üblichen Methoden gemessen zu werden. Selbst wenn einige nützliche Informationen in der Norm ISO 354 für Hallräume gegeben werden, so ist doch die Messung von kurzen Nachhallzeiten außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm. Deswegen müssen die Messmethoden unter Rückgriff auf Erfahrungen definiert werden, die bei anderen praktischen Messungen gemacht worden sind und unter Nutzung der Möglichkeiten, die moderne Instrumentierung bietet. Dies ist ein sehr kompliziertes Gebiet und kann nur von Spezialisten behandelt werden.

#### **A5-2.2.5 Berechnung und Vorhersage der Nachhallzeit**

Es gibt viele mehr oder weniger taugliche Formeln für die Vorhersage der Nachhallzeit in einem Raum, abhängig von den individuellen Raumeigenschaften. Im Wesentlichen können zwei Gruppen von Theorien erwähnt werden, die „klassische Theorie“ und die „Richtungstheorie“.

#### Klassische Theorie

Die erste entwickelte Theorie war die Sabine-Formel (1902) und sie ist die Basis der so genannten „klassischen Theorie“. Ebenso sind die Formeln von Eyring und Norris (1930-32) und Millington und Sette (1932-33) oder die Kutturff-Formel in diese Theorie eingeschlossen. Wir stellen die gebräuchlichsten Formeln vor: Sabine und Eyring.

Alle diese Formeln gehen davon aus, dass das akustische Feld in einem Raum diffus ist.

Die Nachhallzeit definiert durch Sabine ist umgekehrt proportional zu dem durchschnittlichen Absorptionskoeffizienten, der als arithmetisches Mittel aller Absorptionskoeffizienten für alle Oberflächen in dem Raum ermittelt wird. Diese Gleichung ist für Räume mit langen Nachhallzeiten und einem diffusen akustischen Feld anwendbar.

$$T_{\text{Sab}} = 0,16 \cdot \frac{V}{S \cdot \alpha_{\text{Sab}}} = 0,16 \frac{V}{A} \quad [2]$$

In order to take into account environmental absorption, temperature and relative humidity need to be measured with a precision of  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  and  $\pm 5\%$ .

In the standard, specifications about acoustic sources and suggested microphones and filters can be found in agreement with the usual norms and depending on different aspects.

Enough measurement positions must be selected to cover the whole room and to avoid the influence of direct sound with a minimum distance between source and microphone given by the expression:

where V is the volume of the room in  $\text{m}^3$ , c is the speed of sound in m/s and T the reverberation time in s.

For small rooms, where the previous requirement is not satisfied, an acoustic barrier with negligible absorption can be introduced between source and microphone.

In considering the excitation of a room, two methods are established: the *interrupted method* and the *impulse response method*, equivalent to the two methods (with sound source / with impulse source) mentioned earlier.

The standard suggests to measure frequencies in octaves between 63 Hz and 4 kHz in concert halls / speech auditoria; and in third-octaves between 100 Hz and 5 kHz in rooms for other purposes. Modern equipment allows for a measurement in octaves in every case, which is easier.

#### Measurement of short reverberation times below 0,3 seconds

For some rooms (listening and recording studios, video-conferencing rooms, radio and TV control rooms), reverberation time is too short to be measured in third-octave bands by usual methods. Even if some useful information is given in ISO 354 for reverberation rooms, the measurement of short reverberation time is outside the field of that standard. Consequently, the measurement procedures must be defined utilising experience from other practical measurements, and the possibilities offered by modern instrumentation. This is a very complicated area to be dealt with only by specialists.

#### **A5-2.2.5 Calculation and prediction of reverberation time**

There are many formulae more or less suitable for the prediction of the reverberation time in a room, depending on the individual room characteristics. Mainly, two sets of theories can be mentioned, the “classic theory” and the “directional theory”.

#### Classic theory

The first theory developed was the Sabine formula (1902) and it is the basis of the so-called “classic theory”. Also, the Eyring and Norris (1930-32) and Millington and Sette (1932-33) or the Kutturff formulae are included and this theory. We present the two most popular formulae: Sabine and Eyring.

All these formulae assume that the acoustic field in the room is diffuse.

Reverberation time defined by Sabine is inversely proportional to the averaged absorption coefficient, which is obtained as the arithmetic mean of all absorption coefficients for all surfaces in the room. This equation is valid for rooms with long reverberation times and diffuse acoustic fields.

wobei  $T_{Sab}$  die Nachhallzeit ist, die mit der Sabine-Formel berechnet wird,  $0,16 \approx 60/(1,086 \cdot c)$  für  $20^\circ\text{C}$ ,  $V$  ist das Raumvolumen in  $\text{m}^3$ ,  $S$  alle Oberflächen in  $\text{m}^2$ ,  $A$  die äquivalente

Schallabsorptionsfläche des Raumes in  $\text{m}^2$  und  $\bar{\alpha}_{Sab}$  der Absorptionskoeffizient, gemessen in einem Labor.

$$S \cdot \bar{\alpha}_{Sab} = \sum S_i \cdot \alpha_{iSab} = A \quad [3]$$

Eyring and Norris benutzten dieselbe Vorhersageformel und führten eine logarithmische Abhängigkeit zu Sabine's Reflexionskoeffizienten ein.

$$T_{Eyr} = \frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_{Sab})} \quad [4]$$

$\bar{\alpha}_{Sab}$  muss von  $\bar{\alpha}$  unterschieden werden, welcher vor Ort gemessen oder berechnet wird. Der theoretische Absorptionskoeffizient in der Sabine-Formel kann einen Wert  $> 1$  annehmen, wie manchmal in der Literatur oder in Herstellerangaben vorgefunden. Wenn dies der Fall ist, sollte grundsätzlich ein Wert von 1 oder höchstens 0,9 angenommen werden. Wenn jedoch kleinere Absorberplatten als Einzelelemente benutzt werden, was bedeutet, dass sie mit gegenseitigem Abstand montiert werden, sind Absorptionskoeffizienten  $> 1$  zulässig.

Die Sabine- und die Eyring-Formeln sind leicht unterschiedlich. Für hohe Gesamtschallabsorption gibt die Sabine-Formel längere Nachhallzeiten als die Eyring-Formel, jedoch werden die Unterschiede kleiner, wenn der Gesamtbetrag der Schallabsorption abnimmt. Grundsätzlich kann gesagt werden, wenn

$\bar{\alpha}_{Sab} > 2$  ist die Abweichung gemäß der Sabine-Formel größer als 10%. In solchen Fällen wird die Eyring-Formel empfohlen. In den meisten Fällen bedeutet die Erwähnung von  $T$ :  $T_{Sab}$ .

#### Richtungstheorie

Es ist allgemein bekannt, dass die Sabine- und die Eyring-Formeln deutlich daneben liegen, wenn die Schallabsorption des Raumes ungleichmäßig verteilt ist. Daher müssen zur Vorhersage der Nachhallzeit in Räumen mit inhomogener Absorptionsverteilung andere Formeln benutzt werden.

Einige Formeln, die Korrekturen zur klassischen Theorie vorsehen, sind entwickelt worden: Fitzroy (1959), Arau (1988), Tohyama (1995), Neubauer (2000), Nilsson (EN 12354-6).

Unglücklicherweise ist es schwierig, irgendeine von diesen Formeln als allgemein gültig zu empfehlen, selbst wenn das tatsächliche Problem sehr allgemein ist (z. B. Klassenräume, in denen nur die Decke Absorptionsfläche ist, Büros mit Absorptionsflächen an Decke und Boden).

Einige Forschungen zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse je nach benutzter Formel. Aber diese Forschungen sind für verschiedene Räume und Situationen gemacht worden und es ist schwierig, die Ergebnisse zu vergleichen, um eine Empfehlung zu geben.

Es ist wichtig zu verstehen, dass die Gleichungen, die für akustische Vorhersagen benutzt werden, genauso wichtig sind wie die Absorptionswerte, die für die Formeln benötigt werden. Die Werte für Absorptionskoeffizienten werden aus Messungen in einem Prüfraum unter Verwendung von ungeeigneten Formeln gewonnen, da Standardspezifikationen für Absorptionskoeffizientmessungen in Hallräumen die Sabine-Formel unter den Bedingungen eines nicht gleichmäßigen Schallfeldes benutzen. Diese Tatsache führt einen Fehler in die Vorhersage der Nachhallzeit ein, der von der gewählten Theorie unabhängig ist, da die Anfangswerte falsch sein können.

Aus diesen Gründen sind Computervorhersagen für Nachhallzeiten in marktgängigen Programmen nicht genauer als die beste analytische Vorhersage.

Zur Information werden nachstehend verschiedene Ergebnisse von Berechnungen und Messungen von  $T$  in einem Seminarraum einer Universität angegeben, um das Problem der Vorhersagbarkeit darzustellen.

where  $T_{Sab}$  is the reverberation time, calculated with the Sabine formula,  $0,16 \approx 60/(1,086 \cdot c)$  for  $20^\circ\text{C}$ ,  $V$  is the volume of the room in  $\text{m}^3$ ,  $S$  is the area of all surfaces in  $\text{m}^2$ ,  $A$  is the equivalent

absorption area of the room in  $\text{m}^2$  and  $\bar{\alpha}_{Sab}$  the absorption coefficient measured in a laboratory.

Eyring and Norris used the same prediction formula introducing a logarithmic dependence to Sabine's reflection coefficient.

$\bar{\alpha}_{Sab}$  must be distinguished from  $\bar{\alpha}$ , measured or calculated in-situ. This theoretical Sabine's absorption coefficient can reach a value greater than 1, as found sometimes in literature and suppliers' information. If so, a value of 1 or even maximum 0,9 should be generally applied. Yet, when smaller absorber panels are used as single elements, which means that they are mounted with mutual distance, absorption coefficients greater than 1 are allowable.

The Sabine and Eyring formulae are slightly different. For high total sound absorption, the Sabine formula gives longer reverberation times than the Eyring formula, but the differences become smaller as the total amount of sound absorption de-

creases. Generally, it can be said that, when  $\bar{\alpha}_{Sab} > 0,2$ , the error according to Sabine's formula is greater than 10%. In this case, the Eyring formula is recommended.

In most cases, a mention of  $T$  means  $T_{Sab}$ .

#### Directional theory

It is generally known that Sabine's or Eyring's formulae are seriously in error if the sound absorption of the room is unevenly distributed. Then, in order to predict the reverberation time in rooms with non-homogeneous absorption distribution, other formulae must be used.

Some formulae, introducing correction to the classic theory, have been developed: Fitzroy (1959), Arau (1988), Tohyama (1995), Neubauer (2000), Nilsson (EN 12354-6).

Unfortunately, even the actual problem is very common (e. g. classrooms with absorption only in the ceiling, offices with absorption in ceiling and floor), it is difficult to recommend one of those formulae for a general purpose.

Some researches show very different results depending on the formula used. But these researches are made for different rooms and situations, and it is not easy to compare the results in order to give a recommendation.

It is important to understand that the equations used in acoustical design are as important as the absorption values required in the formulae. The absorption coefficient values are obtained from measurements in a test chamber using non-appropriate equations, because standard specifications for absorption coefficient measurements in reverberation chambers use Sabine's formula in non-uniform sound field situations. This fact introduces an error in predicting reverberation time independent of the chosen theory because initial values may be wrong.

For these reasons, computer predictions of reverberation time in commercially available programs are not more accurate than the best analytical prediction.

For information, below different results of calculations and measurements of  $T$  in a classroom of a university are given to illustrate the problem of predictability.

Frequenz Frequency	Gemessen Measured	Sabine	Fitzroy	Eyring	Milling	Kuttruf	Arau	Neubauer
125	0,89	1,06	0,95	0,98	0,97	1,02	0,92	0,94
500	0,58	0,66	0,97	0,57	0,54	0,62	0,67	0,53
1000	0,50	0,54	1,2	0,46	0,42	0,50	0,62	0,42
2000	0,74	0,63	1,69	0,55	0,50	0,59	0,79	0,50

**Tabelle 1: Messungen von T im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen im Seminarraum einer Universität: Besetzung 50 %**

**Table 1: Measurements of T compared to calculation results in a university classroom: occupancy 50%**

Gemäß verschiedener Nachforschungen ist eine ingenieurge-rechte Genauigkeit von Nachhallzeitvorhersagen in praktischen Anwendungen  $\pm 10\%$  (das bedeutet die Differenz zwischen der theoretischen Vorhersage und der praktischen Messung).

Aus diesen Gründen gibt es keine Formel, die in allen Fällen anwendbar wäre. Die Sabine-Formel ist die einfachste und gibt eine ausreichende Annäherung in den meisten Fällen. Wo jedoch eine größere Genauigkeit benötigt wird, kann man professionelle Kalkulationssoftware benutzen, viel komplizierter, und es wird eine Angelegenheit für Spezialisten.

Es kann festgehalten werden, dass die Norm für die Messung des Absorptionskoeffizienten von einem Material in einem Hallraum die Sabine-Formel benutzt. Wenn jedoch das zu messende, absorbierende Material in einen Raum eingeführt wird, ist die Absorption in dem Raum nicht mehr gleichmäßig verteilt und zumindest eine der Bedingungen für die Tauglichkeit der Sabine-Formel ist nicht erfüllt.

### A5-2.3 Sprachverständlichkeit

#### A5-2.3.1 Allgemeines

Einer der wesentlichen Parameter, um das akustische Verhalten von irgendeinem Ort zu bestimmen, ist die Sprachverständlichkeit, worunter die Verständlichkeit von gesprochenen Wörtern verstanden wird.

In der Tat ist die genaue Art und Weise, in der der Ohr-Gehirn-Mechanismus die Sprache entschlüsselt, immer noch ein Geheimnis. Solche Faktoren wie Lautstärke, Dauer und spektraler Gehalt bestimmen sicherlich die Sprachaufnahme, aber ihre gegenseitige Beeinflussung ist nicht vollständig enträtselt.

Verminderte Verständlichkeit ist verbunden mit dem Verlust von Information, verschlüsselt durch eine Anzahl von sehr interaktiven Elementen, und von vielen Faktoren beeinflusst.

Das häufigste Hindernis für hochwertige Verständlichkeit ist das Eindringen von ungewünschtem Schall, der das Sprachsignal überlagert. Diesen Effekt nennt man „Verdeckung“, ein allgemeiner Ausdruck, der eine große Vielzahl von Situationen abdeckt. Eine Beziehung zwischen der Stärke des Sprachsignals und dem verdeckenden Lärm wird das *Signal-zu-Nebengeräusch*-Verhältnis genannt und in Dezibel ausgedrückt.

Viele andere Faktoren beeinflussen Verständlichkeit, nicht nur objektive (messbare) Phänomene, sondern auch subjektive Empfindungen: der Zusammenhang eines Gesprächs, das Ablesen von den Lippen, Klang oder Absicht vom Sprecher oder Zuhörer, usw. Wir beschränken uns jedoch in diesem Kapitel auf die Aspekte, die gemessen und abgeschätzt werden können und dadurch für einen Vergleich der Sprachverständlichkeit in Räumen herangezogen werden können.

Als erste theoretische Information ist es interessant zu wissen, dass die Konsonanten das Verständnis einer mündlichen Mitteilung bestimmen. Im Falle einer normalen Konversation ist der größte Beitrag vom Stimmpegel im mittleren Frequenzbereich. Die unten stehende Tabelle gibt einige Informationen.

According to some investigations, an engineering-type accuracy of reverberation time predictions in practical applications is  $\pm 10\%$  (this means the difference between theoretical prediction and practical measurement).

Therefore, there is no formula applicable in every case. The Sabine formula is the simplest and gives a sufficient evaluation in most cases. However, when a better accuracy is needed, we can use provisional calculation software, more complicated, and it becomes a specialist concern.

We can notice that the standard for the measurement of the absorption coefficient of a material in a reverberant room uses the Sabine formula. But, when the absorbing material to be measured is introduced in the room, the absorption in the room is not uniformly distributed anymore and at least one of the Sabine's formula validity conditions is not met.

### A5-2.3 Speech intelligibility

#### A5-2.3.1 General

One of the essential parameters to determine the acoustic behaviour of any place is the intelligibility of speech, understood to be the comprehensibility of spoken words.

In fact, the precise way in which the ear-brain mechanism decodes speech remains something of a mystery. Such factors as loudness, duration and spectral content certainly affect speech perception, but how they may interact is not fully understood.

Diminished intelligibility is associated with a loss of information that is coded in a number of highly interactive elements, and many factors influence it.

The most common obstacle for a high-quality intelligibility is the intrusion of unwanted sounds that interfere with the speech signal. The effect is called "masking", a general term that covers a very wide variety of situations. One relationship between the strength of the speech signal and the masking sound is called the *signal-to-noise* ratio expressed in decibels.

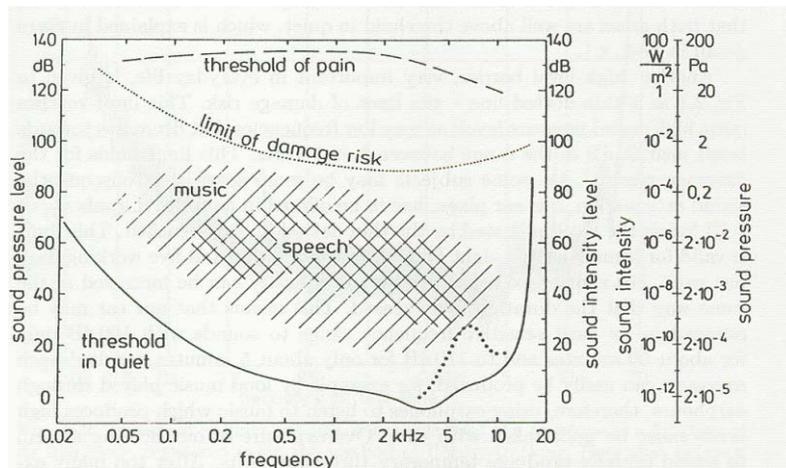
Many other factors influence intelligibility, not only objective (measurable) phenomena, but also subjective perception: context of conversation, lecture of lips, tone or mind of speaker or listener, etc. However, in this chapter we focus on those aspects which allow for measurement, evaluation and are thereby suitable for a comparison of the intelligibility of speech in rooms.

As initial theoretical information, it is interesting to know that consonants determine the comprehension of an oral message. In case of a normal conversation, the maximum contribution at the level of voice is provided in the medium frequencies. The table below shows some information.

	Ungefährer Frequenzbereich <i>Approximate frequency range</i> (Hz)
Bereich der Sprache <i>Speech range</i>	200 – 6000
Sprachverständlichkeit / wichtigste Frequenzen <i>Speech intelligibility / frequencies most necessary</i>	500 – 4000
Sprachdiskretionsbereich (enthält Sprachschall, der am unangenehmsten in angrenzende Bereiche dringt) <i>Speech privacy range (containing speech sounds which intrude most objectionably into adjacent areas)</i>	250 – 2500
Männliche Stimme (höchste Frequenz der Energieabstrahlung) <i>Male voice (peak frequency of energy output)</i>	280 – 350
Weibliche Stimme (höchste Frequenz der Energieabstrahlung) <i>Female voice (peak frequency of energy output)</i>	500 – 700

**Tabelle 2: Bedeutendste Frequenzbereiche von Sprachkommunikation**

**Table 2: Significant frequency ranges for speech communication**



**Bild 3: Hörbarkeitsbereich und Bereiche für Musik- und Sprachabstrahlung**

**Figure 3: Hearing area and areas for music and speech emission**

In der nachstehenden Tabelle sind die Spektren von männlichen und weiblichen Stimmen (Normalpegel) in 1 m (männlich) und 0,25 m (weiblich) gemäß der Norm ISO 9921:2003 angegeben (der sich auf CEI 60268-16 bezieht). In der Tabelle wird das weibliche Stimmspektrum in 1 m Abstand gemäß Formel [5] kalkuliert.

In the table below, the spectra of men's and women's voices (normal level) at 1 m (man) and at 0,25 m (woman) distance are given according to ISO 9921:2003 (which refers to CEI 60268-16). In the table, the women's voice spectrum at 1 m was calculated according to equation [5].

Oktave <i>Octave</i>	125	250	500	1000	2000	4000	8000	dB	dB(A)
männlich, 1 m <i>men, 1 m</i>	62,9	62,9	59,2	53,2	47,2	41,2	35,2	67	60
weiblich, 0,25 m <i>woman, 0,25 m</i>	61,6	71,3	64,1	56,9	50,2	49,3	48	73	66
weiblich, 1 m (berechnet) <i>woman, 1 m (calculated)</i>	49,6	59,3	52,1	44,9	38,2	37,3	36	41	54

**Tabelle 3: Männliche und weibliche Stimmspektren**

**Table 3: Spectra of men's and women's voices**

Der Stimmpegel im Abstand r (Hörerposition) vom Redner wird gemäß der nachstehenden Formel für jedes Oktavband in dB oder dB(A) berechnet:

The voice level at a distance r (listener position) from the speaker is calculated according to the following equation in dB or dB(A) for each octave band:

$$L_{r,L} = L_{S,1} - 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{r}{r_0} \right) \quad [5]$$

wobei  $L_{r,L}$  der Stimmpegel des Sprechers an der Hörerposition ist,  $L_{S,1}$  ist der Stimmpegel des Sprechers in einem Referenzabstand ( $r_0 = 1$  m) gemäß Tabelle 3 und r der Abstand (m) Sprecher-Hörer.

where  $L_{r,L}$  is the speaker's voice level at the listener position,  $L_{S,1}$  is the speaker's voice level at the reference distance ( $r_0 = 1$  m) according to Table 3 and r the distance (m) speaker – listener.

Gemäß ISO 9921:2003 ist diese Gleichung bei  $r < 2$  m stets anwendbar. Wenn  $T < 2$  s, ist sie für 500 Hz bei  $r < 8$  m anwendbar.

According to ISO 9921:2003, this equation is always valid for  $r < 2$  m. When  $T < 2$  s, for 500 Hz it is valid for  $r < 8$  m.

In Räumen mit langen Nachhallzeiten ist die Sprachverständlichkeit sehr niedrig. Das liegt daran, dass der Energieabfall von Vokalen in solchen Räumen deutlich langsamer ist als dies im Freien der Fall wäre. Dies liegt an der zeitlichen Überlappung der Vokale und Konsonanten, die Konsonanten werden verdeckt.

Bei normaler Konversation zwischen zwei Menschen erreicht der Schallpegel in einem Meter Abstand vom Sprecher normalerweise 50 dB(A) bis 65 dB(A), wenn das Hintergrundgeräusch weniger als 50 dB(A) ist. Wenn der Hintergrundgeräuschpegel steigt, muss der Sprachpegel ebenfalls angehoben werden. Wenn z. B. das Hintergrundgeräusch 60 dB(A) erreicht, wird der Sprachpegel um 3 dB(A) bis 6 dB(A) angehoben. Wenn eine große Anzahl von Personen spricht (z. B. in einem Sitzungsraum oder im Restaurant), ist das gesamte Hintergrundgeräusch eine Kombination des ursprünglichen Hintergrundgeräusches und des Geräusches der vielen parallelen Gespräche. In dieser Situation, in der jede Person ihren Stimmpegel erhöht, erhöht sich auch das Hintergrundgeräusch, was zu dem Bedürfnis führt, die Lautstärke des eigenen Gesprächs weiter zu erhöhen, usw. Dies nennt man auch den „Cocktail Effekt“ (siehe A5-3.7.2.1).

#### A5-2.3.2 Indizes für die Bestimmung der Sprachverständlichkeit

Es gibt viele Indizes und Parameter, die die Sprachverständlichkeit bestimmen. Dieses Kapitel behandelt einige der nützlichsten. Einige brauchbare Methoden und Informationen bezüglich der Sprachverständlichkeit sind in [ISO 9921:2003 „Beurteilung der Sprachkommunikation“](#) enthalten. Die Information in diesem Kapitel stammt aus dieser ISO, aber auch aus verschiedenen anderen Dokumenten und Empfehlungen aus aktuellen akustischen Berechnungen in Europa. Zum Beispiel erwähnt ISO 9921 den Sprachverständlichkeitsindex (SII), der in den USA weit verbreitet ist (gemäß ANSI S3.5:1997), jedoch nicht in Europa.

Die Verständlichkeit kann mit „subjektiven Messgeräten“ gemessen werden oder mit „objektiven (Maschinen) Messgeräten“. Die erste Methode benutzt Menschen anstelle elektronischer Testinstrumente, um Sprachkommunikationssysteme abzuschätzen.

Die ersten Theorien über Verständlichkeit basierten auf *Nachhallzeit und Schalldruckpegeln* am Ort des Hörers (Signal-Geräusch-Verhältnis, SNR). Während des letzten Jahrhunderts wurde eine Fülle von Nachforschungen angestellt, um einen brauchbaren Parameter zu erhalten, der, basierend auf Nachhallzeit und SNR, einen objektiven Wert für Verständlichkeit angeben würde. Für anspruchsvolle akustische Entwürfe werden verschiedene Parameter benutzt. Zum Beispiel:

- Für die Analyse des Nachhalls: %ALCons, Verhältnis direkter Schall zu Nachhall, Verhältnis nützlicher zu störendem Schall, Verhältnis frühe zu später Schallenergie.
- Signal-Geräusch-Verfahren: AI, STI, RASTI.

In diesem Kapitel werden einige Informationen zu den nützlichsten Parametern gegeben, die bei praktischen Entwurfs- oder Ingenieuraufgaben helfen können. Diese Parameter sind:

- Schallpegel in dB(A)
- Artikulationsindex (AI)
- Sprach-Störschall-Pegel (SIL)
- Prozentualer Artikulationsverlust von Konsonanten (%ALCons)
- Sprachübertragungsindex oder rascher Sprachübertragungsindex (STI, RASTI).

In der folgenden Tabelle sind die Grenzen jedes dieser Parameter dargestellt.

In rooms with a long reverberation time, the intelligibility is very low. This is due to the fact that the energetic decline of vowels in such a room is perceptibly slower than would be in the open. This is caused by a temporary overlap of vowels and consonants, masking the consonants.

In a normal conversation between two people, the sound level 1 m away from the speaker usually reaches between 50 dB(A) and 65 dB(A) when the background noise is below 50 dB(A). As the background noise level increases, the voice level must also be increased. If the background noise reaches e. g. 60 dB(A), the voice level will be increased by 3 dB(A) to 6 dB(A). When a lot of people is talking (e. g. in a meeting room or a restaurant), the total background noise is the combination of the original background noise and the “noise” of many parallel conversations. In this situation, as each person increases its voice level, the total background noise also increases, resulting in a requirement to further increase the volume of ones conversation, and so on. This is known as “cocktail effect” (see A5-3.7.2.1).

#### A5-2.3.2 Indices for the determination of speech intelligibility

There are many indices and parameters determining the intelligibility of speech. This chapter deals with some of the most useful. Some useful methods and information regarding intelligibility are given in [ISO 9921:2003 “Assessment of speech communication”](#). The information given in this chapter comes from that ISO, but also from different documentation and recommendations from the actual acoustic calculations in Europe. ISO 9921 mentions e. g. the Speech Intelligibility Index (SII) widely used in the USA (according to ANSI S3.5:1997), but not in Europe.

The intelligibility can be measured by “subjective measures” or by “objective (machine) measures”. The first one uses human beings, rather than electronic test instruments to assess speech communication systems.

The first theories about intelligibility were based on *reverberation time and sound pressure levels* at the listener’s position (signal-to-noise ratio, SNR). During the last century, a lot of investigations were developed in order to obtain a good parameter able to give an objective value of intelligibility, based on reverberation time and SNR. For a high-quality acoustic design, different parameters are used. For example:

- For reverberation analysis: %ALCons, direct-to-reverberant ratio, useful-to-detrimental sound ratios, early-to-late sound energy ratio.
- Signal-to-noise methods: AI, STI, RASTI.

In this chapter, we give some information regarding the most useful parameters that can help practical engineering or designer work. These parameters are:

- sound pressure level in dB(A)
- Articulation Index (AI)
- Sound Interference Level (SIL)
- Percentage Articulation Loss of Consonants (%ALCons)
- Speech Transmission Index or Rapid Speech Transmission Index (STI, RASTI).

In the following table, the limitations of each of them are exposed.

	Hintergrundgeräuschspektrum, nicht gleichmäßig <i>Spectrum of the background noise is not plane</i>	Zeitabhängige Schallpegel- differenzen <i>Differences in the sound level with time</i> > 10 dB	Starker Nachhall <i>Very reverberant ambiance</i> (TR > 2 s)	Verzerrte Sprache <i>Distorted speech</i>
SPL (dB(A))	nicht gültig <i>not valid</i>	nicht gültig <i>not valid</i>	nicht gültig <i>not valid</i>	nicht gültig <i>not valid</i>
SIL		nicht gültig <i>not valid</i>	nicht gültig <i>not valid</i>	nicht gültig <i>not valid</i>
AI				nicht gültig <i>not valid</i>
%ALCons – STI/RASTI				gering zuverlässig <i>slightly trustworthy</i>

**Tabelle 4: Grenzen der Gültigkeit der Indizes**

Gemäß ISO 9921 haben STI und SII eine Genauigkeit von 1 dB bis 2 dB und SIL eine Genauigkeit von 2 dB bis 3 dB. Allerdings gibt die Norm diese Zahlen nur „informativ“.

Frühe Versuche, die Verständlichkeit vorherzusagen, führten zu der Entwicklung des Artikulationsindex (AI). Ein Grundprinzip dieses AI ist es, dass die Sprachverständlichkeit vom gewichteten Durchschnitt des Signal-Geräusch-Verhältnisses (SNR) in den sprachrelevanten Frequenzbändern abhängt. Der Index variiert zwischen 0 (gänzlich unverständlich) bis 1 (perfekte Verständlichkeit). Ein AI von 0,3 oder niedriger gilt als unbefriedigend, 0,3 bis 0,5 befriedigend, 0,5 bis 0,7 gut und über 0,7 sehr gut.

Der Sprachübertragungsindex (STI) (gemäß der Norm CEI 60268-16) kann die Effekte des Nachhalls genauso voraussagen wie die zusätzlicher Geräusche. STI-Werte bewegen sich zwischen 0 (völlig unverständlich) bis 1 (perfekte Verständlichkeit).

Der RASTI (rascher Sprachübertragungsindex) wurde als einfachere Alternative zum STI entwickelt. Der RASTI geht davon aus, dass die frühen Reflexionen, die den Hörer während der ersten 60 bis 80 ms erreichen, der Verständlichkeit zugute kommen, während spätere Reflexionen einen negativen Einfluss haben. Im Gegensatz zu STI misst RASTI nur zwei Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen 500 Hz und 2 kHz. Er ist in europäischen Ländern weit verbreitet.

Der %ALCons (prozentualer Artikulationsverlust von Konsonanten) ist bei akustischen Beratern weit verbreitet (besonders in den Vereinigten Staaten), hat aber deutliche Nachteile. Er beruht erstens auf Messungen in einem einzigen Terzband mit der Mittenfrequenz 2 kHz, allen anderen Frequenzen werden ignoriert. Ferner berücksichtigt die Methode viele Faktoren nicht, die die Verständlichkeit beeinflussen können: SNR, Hintergrundgeräuschspektrum, Verzerrung, späte Reflexion oder Echos, usw.

Allerdings kann es genauer sein als RASTI, wenn Nachhall oder starke, spät ankommende Reflexionen die hauptsächlichsten Probleme sind.

Die Bestimmung von SIL und AI geschieht (oder kann geschehen), indem Messungen mit einem Schallpegelmessgerät genommen werden. Im Falle von RASTI wird spezielles handelsübliches Gerät benötigt. Der %ALCons wird ebenfalls maschinell gemessen. Trotzdem geben wir eine Grafik an, die den %ALCons zur Nachhallzeit und zum Schalldruckpegel in Beziehung setzt. Mit dieser Grafik ist es möglich, den %ALCons zu erhalten und, mit der gegebenen Tabelle, das Verhältnis zwischen diesem Parameter und STI/RASTI zu erhalten.

Einige Untersuchungen erlauben die Berechnung (anstatt der Messung) von STI oder RASTI, aber das ist schwierig. Außerdem ist dies nur für einige spezielle Fälle anwendbar, die bereits untersucht worden sind.

**Table 4: Limitation of the validity of indices**

According to ISO 9921, STI and SII have an accuracy of 1 dB to 2 dB and SIL an accuracy of 2 dB to 3 dB. Anyway, the standard gives this data only “as information”.

Early attempts to predict intelligibility led to the development of the Articulation Index (AI). A fundamental principle of this AI is that intelligibility of speech depends on a weighted average of the signal-to-noise ratios (SNRs) in frequency bands spanning the speech spectrum. It varies in value from 0 (completely unintelligible) to 1 (perfect intelligibility). An AI of 0,3 or below is considered unsatisfactory, 0,3 to 0,5 satisfactory, 0,5 to 0,7 good, and greater than 0,7 very good.

The Speech Transmission Index (STI) according to CEI 60268-16) can predict the effects of reverberation as well as additive noise on the intelligibility. STI values vary from 0 (completely unsatisfactory) to 1 (perfect intelligibility).

RASTI (Rapid Speech Transmission Index) was developed as a simpler alternative to STI. RASTI considers that the early reflections arriving at the listener during the first 60 to 80 ms are good for the intelligibility, while the later ones have a bad influence. In contrast to STI, RASTI measures only in two octave bands centred at 500 Hz and 2 kHz, respectively. It is widely used in European countries.

%ALCons (Percentage Articulation Loss of Consonants) method is widely used by acoustical consultants (particularly in the US), but it has significant drawbacks. First, it is based on measurements in a single third-octave band centred on 2 kHz, all other frequencies are ignored. Moreover, the method does not account for many factors that can effect intelligibility: SNR, background noise spectrum, distortion, late reflections or echoes, etc.

However, it can be more accurate than RASTI, when reverberation or strong, late arriving reflections are the primary problems.

The determination of SIL and AI is made (or can be made) taking measurements with a sound level meter. In case of RASTI, special commercial equipment is needed. %ALCons is also measured by a machine. Anyway, we include a chart which relates %ALCons to reverberation time and sound pressure levels. With this chart, it is possible to obtain %ALCons and, with the given table, the relationship between this parameter and STI/RASTI can be obtained.

Some studies allow for the calculation (instead of the measurement) of STI or RASTI, but in a difficult way. Furthermore, this is valid only for some particular cases already investigated.

Da die Verständlichkeit eine starke Abhängigkeit vom Nachhall aufweist – selbst wenn die Nachhallzeit in manchen Formeln für die Verständlichkeit nicht berücksichtigt wird –, ist es wichtig, das Maß der Besetzung eines Raumes einzubeziehen, wenn man Sprachverständlichkeit misst oder berechnet. Nachhall, und damit offensichtlich die Sprachverständlichkeit, wird von der Gegenwart der Zuhörerschaft stark beeinflusst. Die Festlegung des Grades der Verständlichkeit wird für Entscheidungen bezüglich der Notwendigkeit von elektronischen Verstärkungen der Raumakustik benötigt.

#### A5-2.3.2.1 Berechnung vom SIL (Sprach-Störschall-Pegel)

Es sind verschiedene Normen zur Bestimmung vom SIL benutzt worden. Aktuell liegt die Norm ISO 9921:2003 „Beurteilung der Sprachkommunikation“ vor, die Anforderungen für die Leistung von Sprachkommunikation für verbale Alarm- und Gefahrensignale, Informationsnachrichten und Sprachkommunikation im Allgemeinen festlegt. Methoden zur Vorhersage und Abschätzung der Leistung in praktischen Anwendungen werden beschrieben und Beispiele werden gegeben, nicht nur für die Berechnung vom SIL, sondern auch für die Berechnung von anderen Parametern, wie oben angegeben.

Die Norm bestimmt die Verständlichkeit gemäß der Differenz „SIL – Sprachpegel“ an der Hörerposition. Der SIL wird gemäß Formel [6] berechnet und der „Sprachpegel“ an der Hörerposition gemäß Formel (A). Wenn das Ergebnis größer als 10 ist, ist die Konversation zufrieden stellend.

Vor Erscheinen der neuesten Version dieser ISO wurde SIL auf andere Weise benutzt, wie die ANSI S3.14:1977 immer noch tut. Nachstehend ist diese nützliche Alternative erklärt.

SIL wird gemäß der „Standardmethode für vier Oktavbänder“ bestimmt (es gibt eine reduzierte Version mit drei Bändern). Hierzu wird der Schalldruckpegel ( $L_S$ ) in den Oktaven 500 Hz bis 4000 Hz gemessen (mit der Zeitwertung „slow“), man erhält den SIL als arithmetisches Mittel der gemessenen Pegel.

$$SIL = \frac{L_{S500} + L_{S1000} + L_{S2000} + L_{S4000}}{4} \quad [6]$$

Danach wird der erhaltene Wert in die unten stehende Grafik übertragen, die den Abstand zwischen Sprecher und Hörer für eine verlässliche Kommunikation angibt (in der unteren Linie des Bildes sind die dB(A)-Werte eingeführt, um die Verständlichkeit bei gemessenen Pegeln in dB(A) vorherzusagen).

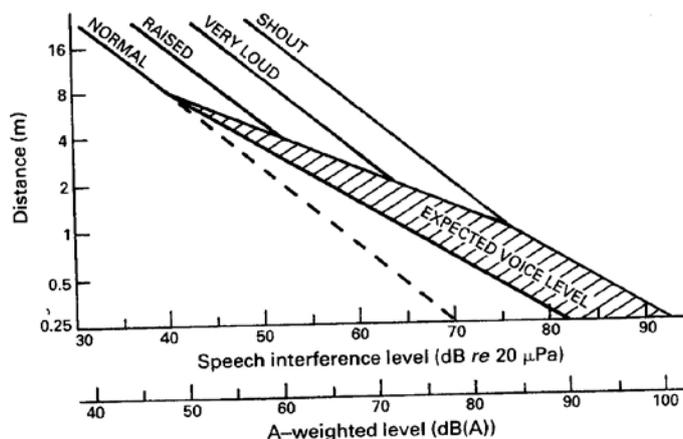


Bild 4: Benutzung vom SIL

As the intelligibility has a strong relation to reverberation – even if reverberation time is not considered in some equations for intelligibility –, it is crucial to take account of the degree of occupancy in a room when measuring or calculating the intelligibility of speech. Reverberation, and thereby obviously the intelligibility of speech, is strongly influenced by the presence of an audience. The establishment of a degree of intelligibility is required for decisions regarding the necessity of electronic reinforcements of room acoustics.

#### A5-2.3.2.1 Calculation of SIL (Speech Interference Level)

Some different standards have been used to determine SIL. Today, ISO 9921:2003 “Assessment of speech communication” specifies the requirements for the performance of speech communication for verbal alert and danger signals, information messages and speech communication in general. Methods to predict and assess the performance in practical applications are described and examples are given, not only for SIL calculation, but also to calculate other parameters, as explained above.

The standard determines the intelligibility according to the difference “SIL to voice level” at the listener position. SIL is calculated according to equation [6] and the voice level at the listener position according to equation (A). If the result is greater than 10, then the conversation is satisfactory.

Before the last version of this ISO appeared, SIL was used in another way, as continues to be used according to ANSI S3.14:1977. Below, this useful alternative is explained.

SIL is determined according to the “normalised method for four octave bands). For this, the sound pressure level ( $L_S$ ) is measured in the octaves 500 Hz to 4000 Hz (with “slow” time weighting), obtaining SIL as the arithmetic average of the levels measured.

Then, the obtained value is carried in the following graph, showing the distance between the speaker and the listener for a reliable communication (take care that in the bottom line of the figure, the dB(A) values are introduced to predict the intelligibility when measuring the levels in dB(A)).

Figure 4: Use of SIL

#### A5-2.3.2.2 Berechnung vom %ALCons (prozentualer Artikulationsverlust von Konsonanten)

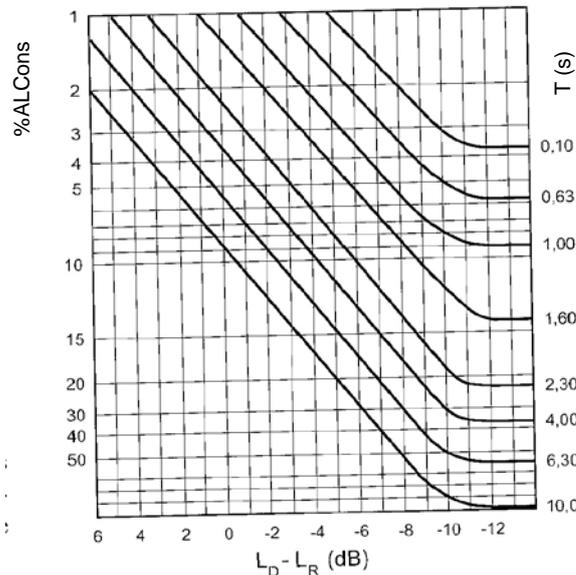
Dieser Parameter steht im Verhältnis mit dem Prozentsatz des Informationsverlusts während einer Konversation. Daher: Je höher der Wert, desto geringer die Verständlichkeit.

#### A5-2.3.2.2 Calculation of %ALCons (Percentage Articulation Loss of Consonants)

This parameter is in relation with the percentage of the loss of information during a conversation, and for this reason, the higher the value, the lesser the intelligibility.

Der Wert des %ALCons an einem Punkt wird unter Berücksichtigung der Nachhallzeit T und der Differenz zwischen den Schalldruckpegeln des direkten Feldes  $L_D$  und des Hallfeldes  $L_R$  an diesem Punkt bestimmt. Diese letzte Differenz erhält man aus den charakteristischen Raumparametern gemäß Formel [7].

The value of the %ALCons in a point is determined taking into account the reverberation time T and the difference between the sound pressure levels of the direct field  $L_D$  and the reverberation field  $L_R$  at that point. This last difference is obtained from characteristic parameters of the room according to equation [7].



**Bild 5: Bestimmung des prozentualen Artikulationsverlustes von Konsonanten (%ALCons)**

**Figure 5: Determination of the Percentage Articulation Loss of Consonants (%ALCons)**

Der %ALCons-Wert wird in diesem Diagramm abgelesen, indem man auf der Abzisse  $L_D - L_R$  einsetzt und auf der rechten senkrechten Achse die Nachhallzeit T (s).

The value of %ALCons is obtained in the above chart, introducing in abscissas  $L_D - L_R$  and in the right vertical axis the reverberation time T (s).

Für die Berechnung von  $L_D - L_R$  gilt die nachstehende Formel:

For the calculation of  $L_D - L_R$ , the following equation is employed:

$$L_D - L_R = 10 \cdot \log \left( \frac{QR}{r^2} \right) - 10 \text{ (dB)} \quad [7]$$

wobei Q der Richtfaktor der Schallquelle in die betrachtete Richtung ist ( $Q = 2$  für menschliche Stimme und frontale Richtung zum Sprecher), R ist die Raumkonstante ( $m^2$ ).

where Q is the directivity factor of the sound source in the direction considered ( $Q = 2$  for human voice and frontal direction to the speaker), R is the constant of the room ( $m^2$ ).

$$R = \frac{A}{1 - A/S} \quad [8]$$

(siehe Gleichung [2] für Definitionen / see equation [2] for definitions)

r ist der Abstand des betrachteten Punktes von der Schallquelle in m.

r is the distance of the point considered to the sound source in m.

Die Berechnung wird für das Band mit der Mittenfrequenz 2 kHz vorgenommen, weil angenommen wird, dass man bei dieser Frequenz den größten Beitrag zur Verständlichkeit des Wortes erhält.

The calculation is made for the band of 2 kHz because it is considered that at this frequency the maximum contribution to the intelligibility of the word is obtained.

Das oben stehende Diagramm zeigt:

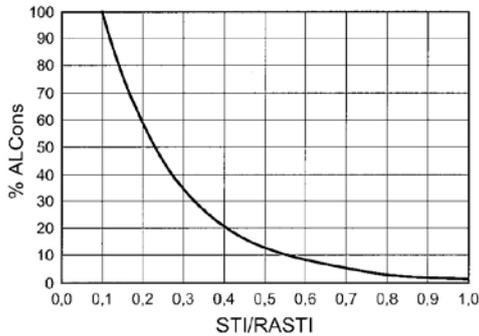
The above graph shows:

- Je näher der Hörer an der Quelle, desto besser die Verständlichkeit.
- Je geringer die Nachhallzeit, desto besser die Verständlichkeit.
- Die Verständlichkeit wird schlechter, wenn der Hörer seinen Abstand zur Quelle vergrößert, bis ein Abstand erreicht wird (entspricht  $L_D - L_R < -10$  dB), wo die Verständlichkeit gleich bleibt.

- The nearer the listener to the source, the better the intelligibility.
- The lower the reverberation time, the better the intelligibility.
- The intelligibility gets worse when the listener increases his distance from the source, until a distance is reached (equivalent to  $L_D - L_R < -10$  dB) where the intelligibility remains constant.

**A5-2.3.2.3 Verhältnis zwischen STI (Sprachübertragungsindex) RASTI (rascher Sprachübertragungsindex) und %ALCons**

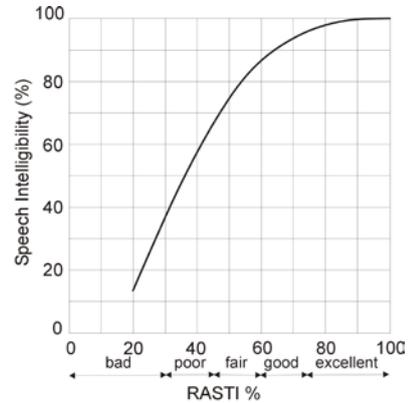
Nachfolgend ist eine Grafik, die das Verhältnis zwischen %ALCons zu STI/RASTI zeigt, und eine Tabelle, die den subjektiven Wert von Verständlichkeitsgraden angibt.



**Bild 6: Verhältnis zwischen den Verständlichkeitsindizes und dem subjektiven Eindruck**

**A5-2.3.2.3 Relationship between STI (Speech Transmission Index), RASTI (Rapid Speech Transmission Index) and %ALCons**

Below is a chart showing the relation of %ALCons with STI/RASTI, and a table showing the subjective value of the grade of intelligibility.



**Figure 6: Relation between intelligibility indices and subjective impression**

%ALCons	STI/RASTI	Subjektive Empfindung <i>Subjective impression</i>	Empfehlungen <i>Recommendations</i>
1,4 – 0	0,88 – 1	sehr gut <i>excellent</i>	
4,9 – 1,6	0,66 – 0,86	gut <i>good</i>	Konferenz- und Lehrräume, Theater <i>Conference and teaching rooms, theatres</i>
11,4 – 5,3	0,5 – 0,64	brauchbar <i>acceptable (fair)</i>	Sporthallen <i>Sport rooms</i>
24,2 – 12	0,36 – 0,49	schwierig <i>poor</i>	
46,5 – 27	0,24 – 0,34	schlecht <i>bad</i>	

**Tabelle 5: Verhältnis zwischen den gemessenen Werten der Sprachübertragungsindizes und dem subjektiven Eindruck**

**Table 5: Correlation between the measured values of speech transmission indices and the subjective impression**

Diese Informationen sind für die meisten europäischen Sprachen anwendbar.

All this information is valid for most European languages.

**Anmerkung zu Psychoakustik**

Die Untersuchung der Fähigkeit des menschlichen Gehörsystems, Informationen aufzunehmen, ist das Ziel von Psychoakustik. In manchen Fällen kann diese Wissenschaft bei der Planung und Umsetzung akustischer Projekte (Raumakustik, musikalische Akustik, Rundfunksendung und Kommunikationssysteme) nützlich sein. Diese Art von Untersuchungen liegt außerhalb des Themas dieses Dokuments.

**Note on psycho-acoustics**

The study of the ability of the human hearing system to receive information is the aim of psycho-acoustics. In some cases, this science can be useful in planning and realising acoustical projects (room acoustics, musical acoustics, broadcasting and communication systems). This kind of studies is outside the scope of this document.

**A5-2.4 Schallausbreitung in Räumen**

**A5-2.4 Sound propagation in rooms**

**A5-2.4.1 Allgemeines**

**A5-2.4.1 General**

Lassen Sie uns eine punktförmige Schallquelle in einem kastenförmigen Raum betrachten. An jedem Ort des Raumes ist das Schalldruckfeld die Gesamtsumme des Schalls, der direkt von der Quelle kommt, und des Schalls, der von den umgebenden Oberflächen reflektiert (Wände, Decke und Boden) wird:

Let us consider a point source placed inside a box-shaped room. In any position of the room, the sound pressure field is the sum total of sounds coming directly from the source and sounds reflected from the limiting surfaces (walls, ceiling and floor):

$$L_{P(\text{indoor})} = 10 \log \left[ 10^{\wedge} \left( L_{P(\text{direct})} / 10 \right) + 10^{\wedge} \left( L_{P(\text{reflected})} / 10 \right) \right] \text{ dB} \quad [9]$$

Die Definition des direkten Schalls ist, dass die Schallwelle noch kein Hindernis getroffen hat. Das heißt, die Ausbreitung entspricht genau derjenigen im freien Feld.

The definition of direct sound is that the sound wave has not yet hit an obstacle. This means that the propagation occurs exactly as in an outdoor free field.

$$L_{P(\text{direct})} = L_W + 10 \log \left( Q / 4\pi r^2 \right) \quad [10]$$

Entsprechend werden zur Berechnung des Schalldrucks des direkten Schalls dieselben Formeln benutzt, nämlich die Formeln [2], [3] und [4] (kugelförmige, halbkugelförmige, viertelkugelförmige Ausbreitung), die im Dokument A6 angegeben sind.

Consequently, the sound pressure of direct sound is calculated using the same equations, namely the equations [2], [3] and [4] (spherical, semi-spherical and quarter-spherical propagation) given in document A6.

$$L_P = L_W - 20 \log(r) - 11 \text{ dB} \quad [11]$$

$$L_P = L_W - 20 \log(r) - 8 \text{ dB} \quad [12]$$

$$L_P = L_W - 20 \log(r) - 5 \text{ dB} \quad [13]$$

**A5-2.4.2 Schallausbreitung in kubischen Räumen (Diffusfeldbedingungen)**

**A5-2.4.2 Sound propagation in cubical rooms (diffuse field conditions)**

Unter der Annahme, dass die drei Dimensionen des Raumes nicht zu stark voneinander abweichen, wird die Schallenergie gleichmäßig durch eine Anzahl von Reflexionen verteilt. Das bedeutet, dass der Schalldruck des reflektierten Schalls praktisch konstant ist.

Provided that the three dimensions of the room do not differ too much, the sound energy is distributed uniformly through a number of reflections. It means that the sound pressure of the reflected sound is practically constant.

$$L_{P(\text{reflected})} = L_W - 10 \log(R/4) \text{ dB} \quad [14]$$

R wird häufig mit A verwechselt. Das Verhältnis zwischen den beiden wird in Formel [8] erklärt.

R is frequently confounded with A. The relation between the two is explained in equation [8].

Wenn man die Formeln [10] und [14] in die Formel [9] einsetzt, erhält man den unten stehenden Ausdruck für die Schallverteilung.

By inserting equations [10] and [14] in equation [9], the below expression for sound distribution is obtained.

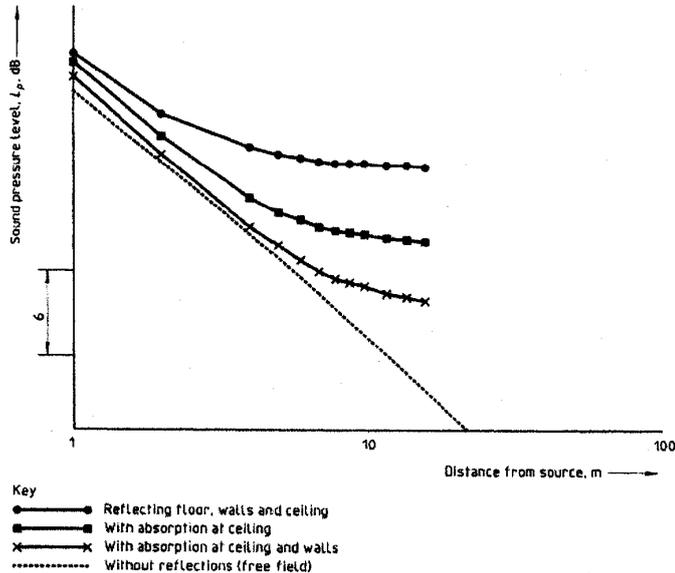
$$L_{P(\text{indoor})} = L_W + 10 \log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right) \text{ dB} \quad [15]$$

- mit Q = 1 für kugelförmige Ausbreitung (Quelle im Zentrum des Raumes)
- Q = 2 für halbkugelförmige Ausbreitung (hoher Raum mit Quelle in Bodennähe)
- Q = 4 für viertelkugelförmige Ausbreitung (hoher Raum mit Quelle in der Raumecke)

- with Q = 1 for spherical propagation (source in centre of room)
- Q = 2 for semi-spherical propagation (high room with source near floor)
- Q = 4 for quarter-spherical propagation (high room with source in room corner)

Wenn man Formel [15] anwendet, führt die Schallverteilung für verschiedene Raumbedingungen zu folgendem Bild:

Applying equation [15], the sound distribution for different room conditions leads to the following figure:



**Bild 7: Typischer Abstand von Schallpegelabnahmekurven für einen Raum mit Diffusfeldbedingungen, mit und ohne unterschiedliche Oberflächengestaltung**

**Figure 7: Typical distance sound level decrease curves for a room with diffuse field conditions, with and without different surface treatments**

**A5-2.4.3 Schallausbreitung in flachen Räumen**

**A5-2.4.3 Sound propagation in flat rooms**

Für Einzelheiten siehe ISO 11690 und VDI 3760; diese Dokumente enthalten auch Einzelheiten für die Schallausbreitung in Räumen von anderen Formen.

For details see ISO 11690 and VDI 3760; these documents also give details for the sound propagation in rooms of other shapes.

Viele Industriehallen und große Büroräume können als flach angesehen werden. Das heißt, dass sie im Verhältnis zu Länge und Breite eine geringe Höhe aufweisen. In solchen Raumabmessungen sind die Diffusfeldbedingungen nicht erfüllt. Die Konsequenz ist, dass der Schallpegel des reflektierten Schallfeldes mit wachsendem Abstand zur Quelle abnimmt.

Many industrial halls and large office rooms may be considered to be flat. This means that they have heights relatively small compared to length and width. In such a room geometry, the diffuse field conditions are not fulfilled. The consequence is that the sound pressure of the reflected sound field decreases with increasing distance from the source.

Für flache Räume ohne Schall ablenkende Körper oder reflektierende Wände (unendlich große Hallen oder Hallen mit stark absorbierenden Wänden) gilt Folgendes:

For flat rooms without dispersing bodies or reflecting walls (indefinitely large hall or hall with highly absorbing walls), the following applies:

$$L_p = L_W - 10 \lg Q + 10 \lg \frac{e^{-D \cdot d}}{d^2} \left[ 1 + \frac{1,6 \cdot (1 - \alpha^*)}{(0,77 \alpha^* + H/d) (1 + H/d)} \right] 1 \text{ m}^2 \quad [16]$$

wobei:  $D = 0,1 \alpha^*/h + \alpha_L$

$\alpha^* = \alpha_c (+\alpha_f)$  = Schallabsorptionskoeffizient der Decke (und möglicherweise des Bodens)

$L_p$  ist der Luftschallpegel in dB

$\alpha_L$  ist der Dämpfungskoeffizient der Luftschallabsorption pro Meter

Q ist der Richtungsfaktor der Schallquelle in die betrachtete Richtung

H ist die Höhe des Raumes in m

d ist der Abstand Quelle – Hörer in m

h ist die Höhe des Absorbers über Grund (bei Schall absorbierenden Decken,  $h = H$ ) in m

e ist 2,71828

where:  $D = 0,1 \alpha^*/h + \alpha_L$

$\alpha^* = \alpha_c (+\alpha_f)$  = sound absorption coefficient of ceiling (and possibly floor)

$L_p$  is the airborne sound level in dB

$\alpha_L$  is the attenuation coefficient of airborne sound absorption per meter

Q is the directivity factor of the sound source in the direction considered

H is the room height in m

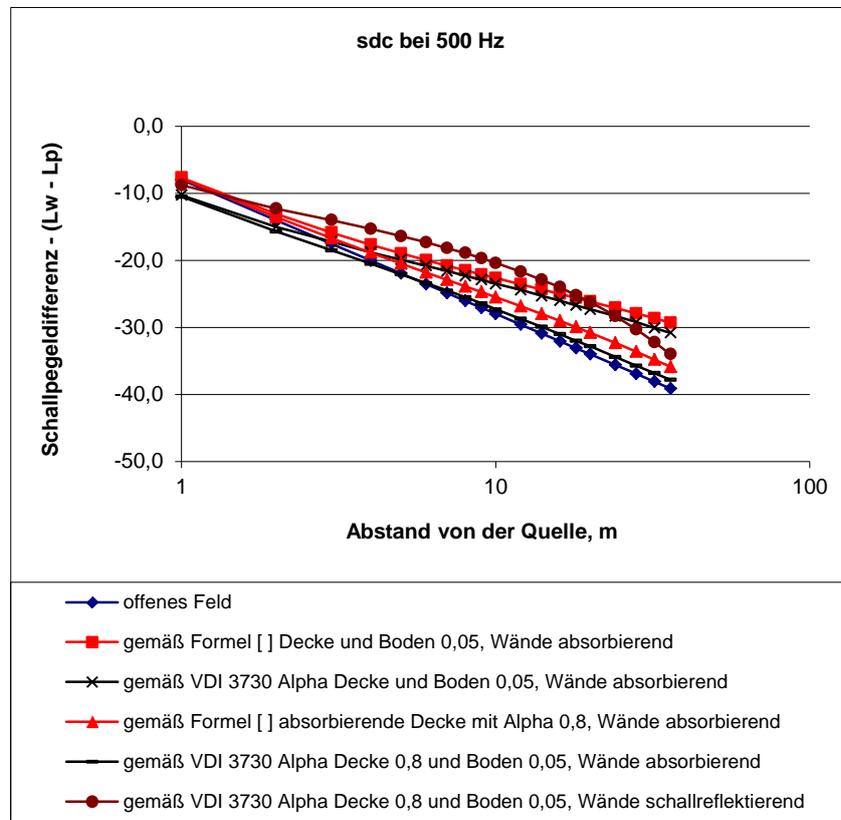
d is the distance source – receiver in m

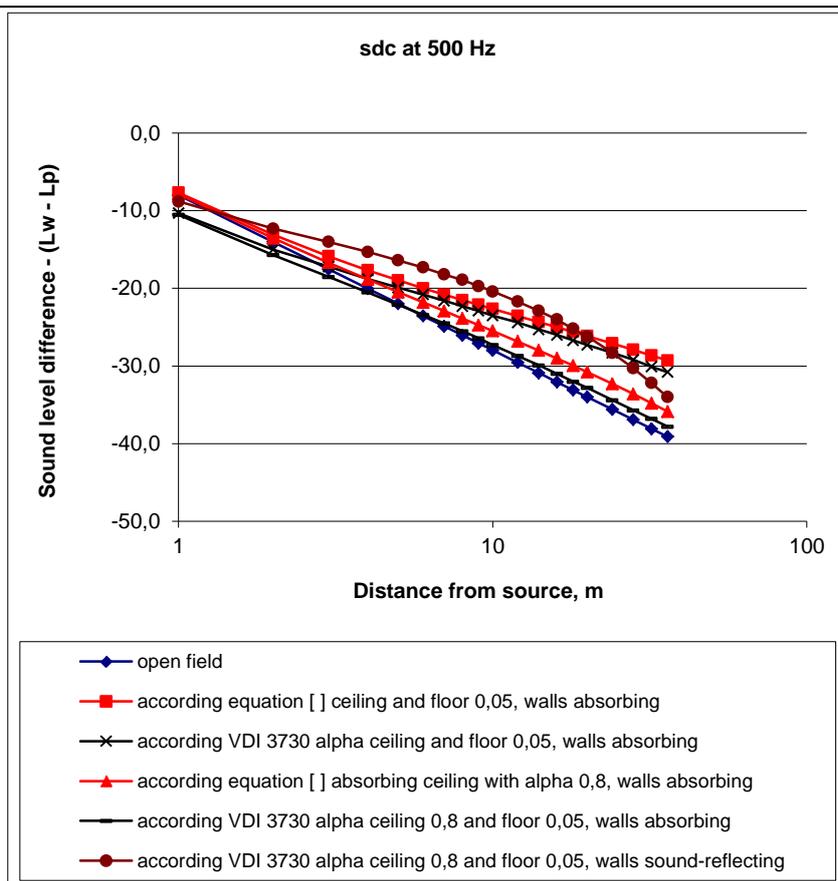
h is the height of absorber above ground (in case of absorbing ceilings,  $h = H$ ) in m

e is 2,71828

Unter Benutzung der Formel [16] erhält man die folgenden Ergebnisse der Schallausbreitung bei 500 Hz in grafischer Darstellung für einen Raum von 4 m Höhe. Aus Gründen des Vergleichs werden die Schallpegeldifferenzkurven (sdc) bei 500 Hz für die gleiche räumliche Situation gemäß der Spiegelschallquellenmethode angegeben (siehe auch ISO 11690 und VDI 3760).

Using equation [16], the following sound propagation results at 500 Hz in graphical display for a room of 4 m height. For reasons of comparisons, the sound level difference curves (sdc) at 500 Hz are given for the same room situation according to the mirror sound source procedure (see also ISO 11690 and VDI 3760).





**Bild 8: Vergleich von Schallabnahmekurven (sd) gemäß einer einfachen Kalkulation mit einer Kalkulation nach VDI 3760**

**Figure 8: Comparison of sound decrease curves (sd) following a simple calculation with a calculation according to VDI 3760**

In den meisten vorhandenen flachen Räumen reflektieren die Wände den Schall und es sind auch Schall ablenkende Körper vorhanden. Dies führt zu einer geringeren Schallpegelabnahme (ungefähr 5 dB bis 10 dB) – siehe auch A5-2.4.5).

With most flat rooms existing in reality, the walls reflect the sound and there are also dispersing bodies. This leads to a lower decrease of sound levels (roughly 5 dB to 10 dB – see chapter A4.2.4.5).

Ähnliche Ergebnisse können unter Benutzung einer Berechnung mit Excel-Software erhalten werden. Die Eingabedaten sind die Reflexionskoeffizienten  $r = (1 - \alpha)$  der Decke und des Bodens ( $r_c$  und  $r_f$ ), die Höhe  $h$  der Quelle und des Empfangspunktes über die Boden, die Höhe  $H$  des Raumes und der Abstand  $d$  zwischen Quelle und Empfangspunkt. Die Berechnung bestimmt den quadratischen Abstand zwischen dem Empfangspunkt und dem Abbild der Quelle auf den Decken- und Bodengrundrissen. Eine Tabelle gibt in einer Richtung den Abstand der Quelle zum Empfangspunkt und in der anderen Richtung den Bereich der Reflexionen an. Jeder Einzelfall der Tabelle ist das Ergebnis von Berechnungen des Terms zwischen den Klammern aus der unten stehenden Formel.

Similar results can be obtained using a calculation with Excel software. The input data are the reflection coefficients  $r = (1 - \alpha)$  of the ceiling and of the floor ( $r_c$  and  $r_f$ ), the height  $h$  over the floor of the source and the receiving point, the height  $H$  of the room, and the distance  $d$  between the source and the receiving point. The calculation determines the square distance between the receiving point and the images of the source by the floor and the ceiling plans. A table gives in one direction the distance source – receiving point and in the other direction the range of the reflections. Each case of the table is the result of calculation of the term given between brackets below.

$$B = \left[ \frac{2r_f r_c}{4(n+1)^2 H^2 + d^2} + \frac{r_f}{4(nH+h)^2 + d^2} + \frac{r_c}{4[(n+1)H-h]^2 + d^2} \right] \quad [17]$$

Damit ist es einfach, für jeden Abstand „Quelle – Empfänger“ das Ergebnis der nachstehenden Formel zu berechnen:

So, it is easy to calculate for each distance “source – receiver” the result of the following equation:

$$L_p - L_w = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \left\{ \frac{1}{d^2} + \sum_{B=0}^n \frac{B}{d^2} \right\} \right) \quad [18]$$

Diese Methode kann benutzt werden, wenn die Wände des flachen Raumes absorbierend sind.

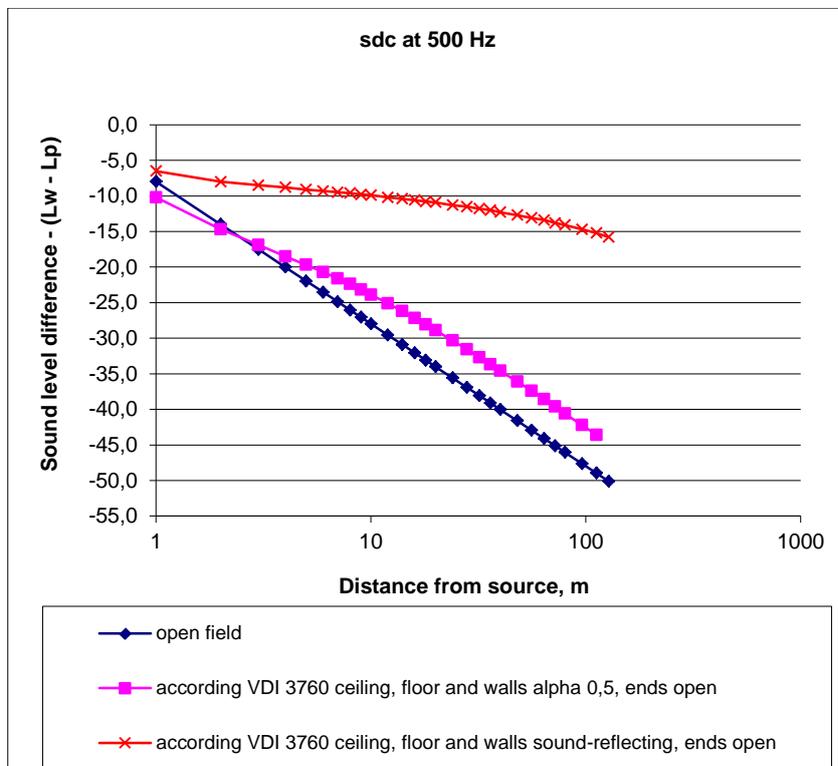
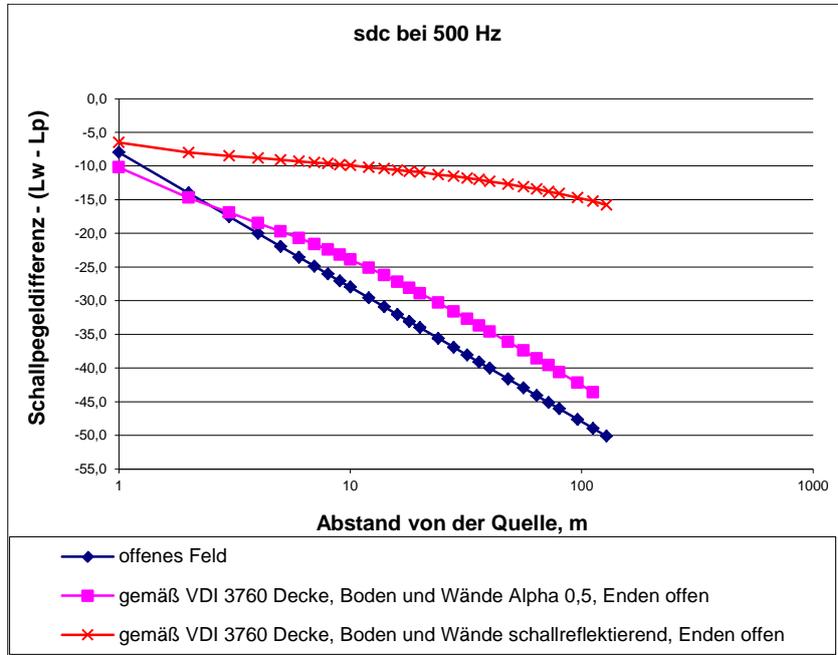
This approach is available when the walls of the flat room are absorbing.

#### A5-2.4.4 Schallausbreitung in langen Räumen

Viele Korridore und Tunnel können als lange Räume betrachtet werden. Das bedeutet, dass eine Abmessung im Vergleich zu den anderen besonders groß ist. Mit Schall reflektierenden Wänden tritt Schallpegelabnahme mit zunehmender Entfernung von der Quelle nur durch die Schallabsorption der Luft auf. Das bedeutet, sie ist sehr niedrig. Bei absorbierenden Wänden und offenen bzw. stark absorbierenden Enden ist die Schalldruckpegelabnahme wie im Freien, ungefähr 6 dB pro Entfernungsverdoppelung, sobald die Entfernung, verglichen mit der Dimension des Querschnitts groß ist.

#### A5-2.4.4 Sound propagation in long rooms

Many corridors and tunnels can be viewed as long rooms. This means that one dimension is very large compared to the others. With sound-reflecting walls, the sound level decrease with increasing distance from the source only occurs through sound absorption by the air. This means it is very low. With absorbing walls and open, respectively highly absorbing ends, the sound pressure level decrease is as in the open, roughly 6 dB per doubling of the distance if the distance is large compared to the dimensions of the cross-section.



**Bild 9:** Räumliche Schallabnahmekurven für einen langen Raum bei 500 Hz für Räume ohne Mobiliar (4 m x 4 m) ohne Ende gemäß VDI 3760

**Figure 9:** Spatial sound decrease curves for a long room at 500 Hz for rooms without furniture (4 m x 4 m) without ends according to VDI 3760

### A5-2.4.5 Komplexe Situationen

Da die Nachhallzeit mit den Frequenzen variiert, sollten die vorstehenden Berechnungen mit einer Reihe von Frequenzbändern durchgeführt werden (am häufigsten werden die Oktavbänder 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz gewählt und manchmal erweitert mit 125 Hz, 250 Hz und 4000 Hz, je nach der vorgesehenen Raumnutzung).

Die meisten tatsächlichen Situationen sind komplexer als oben beschrieben. Hindernisse wie Maschinen und Mobiliar können Schall reflektieren oder abschirmen und dadurch die Schallausbreitung komplizieren. Abgeleitet von der „Daumenregel“ für Schallausbreitung im Freien, dass nämlich der Schalldruck um 6 dB pro Entfernungsverdoppelung von der Quelle abnimmt, benutzt ISO 11690 einen Beschreibungsfaktor  $DL_2$ , der als die Schalldruckabnahme pro Entfernungsverdoppelung von der Schallquelle definiert wird. In der nachstehenden Tabelle (aus ISO 11690) muss die akustische Qualität des Raumes für gut angenommen werden, wenn  $DL_2$  groß ist.

	$\alpha$	$DL_2$
Mit kleinen / mittleren Raumvolumen ( $V < 10.000 \text{ m}^3$ und $h < 5 \text{ m}$ ) ohne absorbierende Decke, leer <i>With small / intermediate volume (<math>V &lt; 10.000 \text{ m}^3</math> and <math>h &lt; 5 \text{ m}</math>) without absorbing ceiling, empty</i>	< 0,2	1 bis / to 3
Mit großen Raumvolumen ( $V > 10.000 \text{ m}^3$ und $h > 5 \text{ m}$ ) ohne absorbierende Decke, mit Einbauten <i>With large volume (<math>V &gt; 10.000 \text{ m}^3</math> and <math>h &gt; 5 \text{ m}</math>) without absorbing ceiling, with fittings</i>	< 0,2	2,5 bis / to 4
Sämtliche Räume mit absorbierenden Decken, mit Einbauten <i>All rooms with absorbing ceiling, with fittings</i>	> 0,3	3,5 bis / to 5

**Tabelle 6: Typische Werte für durchschnittliche Schallabsorptionskoeffizienten ( $\alpha$ ) und dem Schallausbreitungsbeschreibungsfaktor  $DL_2$  im mittleren Bereich**

Eine weitere Beschreibung dieser Phänomene liegt außerhalb des Themas dieses Dokuments. Zusätzliche Informationen können den Referenzdokumenten (ISO 11690, Teile 1 – 3, ISO 14257 und VDI 3760) entnommen werden.

Zusätzlich können mehrere Schallquellen im gleichen Raum anwesend sein. In diesem Fall wird der gesamte Schalldruckpegel an einer vorgegebenen Position als Summe der Schalldruckpegel von jeder Quelle ermittelt.

### A5-2.4.6 Eigenformen und Eigenfrequenzen in Räumen

Durch die Vibrationstheorie ist bekannt, dass wenn ein Element aus dem Gleichgewicht gebracht wird und frei beweglich bleibt, es in einer bestimmten Weise vibriert, die man „Eigenform“ oder „Eigenschwingungsform“ nennt. Dies geschieht z. B. mit einer Stimmgabel, die mit einer bestimmten Frequenz vibriert. Die Räume oder Kapselungen, die als Transmissionsweg des akustischen Feldes fungieren, haben ebenfalls Eigenvibrationsformen, welche, wenn sie angeregt werden, zugehörige hörbare Eigenfrequenzen besitzen. Diese Frequenzen (so genannte „Raumresonanzen“, „zulässige Frequenzen“, „Moden“ oder sogar „Eigentöne“ in sehr spezialisierter Literatur) sind abhängig von Geometrie, Abmessungen und Materialien des Raumes. Gemäß der Wellenmechaniktheorie entsprechen die Eigenfrequenzen stehenden Wellen: solche, die nach Durchlaufen des Raumes an ihren Ausgangspunkt zurückkehren. Es gibt drei Arten von Eigenformen: axial, tangential oder schräg.

Diese Eigenformen und -frequenzen können in kleinen Räumen für tiefe Frequenzen zu ernsthaften Problemen führen. Normalerweise ist bei tiefen Frequenzen das akustische Feld nicht diffus.

Aus diesen Gründen werden einige Empfehlungen zu den Raumabmessungen in den jeweiligen „Anforderungen und Empfehlungen“-Kapiteln dieses Dokuments und in der Literatur angegeben.

### A5-2.4.5 Complex situations

As the reverberation time varies with frequency, the above calculations should be carried out at a number of frequency bands (most frequently the octave bands 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz are chosen and sometimes extended with 125 Hz, 250 Hz and 4000 Hz, dependent upon the intended use of the room).

Most practical situations are more complex than described above. Obstacles like machines and furniture may reflect or screen the sound and thereby complicate the sound propagation. Inspired from the outdoor sound propagation “thumb-rule” that the sound pressure diminishes by 6 dB per doubling of distance from the source, ISO 11690 uses a descriptor  $DL_2$  which is defined as the decrease of sound pressure per doubling of distance from the sound source. In the following table (from ISO 11690), it must be considered that the acoustical quality of a room is good if  $DL_2$  is high.

**Table 6: Typical values for the average sound absorption coefficient ( $\alpha$ ) and sound propagation descriptor  $DL_2$  in the middle region**

Further description of these phenomena is outside the scope of this document. Further information can be traced from the references (ISO 11690, parts 1 – 3, ISO 14257 and VDI 3760).

Furthermore, a number of sound sources may be present in the same room. In that case, the total sound pressure level in a given position is calculated by summation of the sound pressure levels from each source.

### A5-2.4.6 Natural modes and natural frequencies in rooms

By theory of vibrations it is known that when an element is separated of its balance situation, and it remains free, it vibrates in a certain form, which is named a “natural mode” or “natural vibration mode”. This happens e. g. with a diapason that vibrates at a certain frequency. The rooms or enclosures, that act as channel of transmission of the acoustic field, also have natural vibration modes, which, when excited, have associated the audible “natural frequencies”. These frequencies (so-called “room resonances”, “permissible frequencies”, “modes” or even “eigentones” in very specialised literature) depend on the geometry, dimensions and material of the room. According to the theory of wave mechanics, these natural frequencies correspond to standing waves: those which after travelling around the room, return to the origin. There are three types of natural modes: axial, tangential and oblique.

These natural modes and frequencies can cause serious problems in small rooms, for low frequencies. Generally, at low frequencies, the acoustic field is not diffuse.

Due to these reasons, some advice about dimensions of rooms is given in the respective “Requirements and recommendations” chapters of this document and in the literature.

Die Berechnung von Eigenfrequenzen liegt außerhalb des Themas dieses Dokuments und erfolgt gemäß der im Quellenverzeichnis angegebenen Literatur. Als erster Ansatz ist das Folgende zu beachten: Es gibt eine vom Volumen und der Nachhallzeit eines Raumes abhängige Frequenz, unterhalb derer sich Probleme mit Resonanzen und stehenden Wellen ergeben können. Diese Frequenz kann gemäß folgender Formel berechnet werden:

$$f = (c^3 T / 8,8 \pi V)^{1/2},$$

wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit in m/s,  $V$  das Raumvolumen in  $m^3$  und  $T$  die Nachhallzeit in s ist.

#### A5-2.4.7 Schalldiffusion

Die Schalldiffusion besteht aus der Streuung der Schallenergie, in gleichmäßiger Form und in verschiedenen Richtungen. Das Schallfeld ist diffus, wenn in jede Position Energie aus allen Richtungen mit gleicher Stärke einfällt.

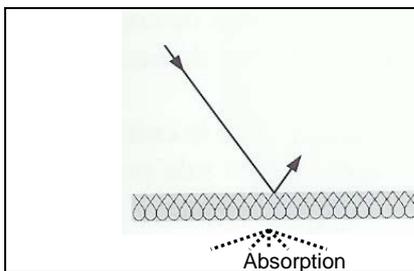
Diffusion hat ihren Grund in der Schallbrechung, die ein theoretisches Konzept der Wellenmechanik ist. Wenn die Wellenlänge des Schalls der Oberflächenrauheit ähnelt, ist die resultierende Verteilung eine komplexe Wellenüberlagerung. Das einfachste Modell ist, dass jeder Punkt der getroffenen Fläche wie eine Punktquelle wirkt und Schall zurück in den Raum abstrahlt. Die resultierende Schalldruckverteilung hängt von der relativen Phase und der Größe aller empfangenen Wellen ab.

In praxisnäheren Dimensionen wird Diffusion im Verhältnis mit dem Nachhall und manchmal mit dem „Nachhallfeld“ „diffuses Feld“ genannt. In vielen Fällen stehen „Nachhall“ und „Diffusion“ für dasselbe Konzept.

Für die Raumakustik kann „Diffusion“ als eine akustische Methode angesehen werden, um die Raumantwort zu verbessern, nämlich als eine Optimierungsmethode. Es ist neben „Reflexion“ und „Absorption“ das „dritte Instrument“, um das gewünschte akustische Verhalten eines Raumes zu erzielen. Das Ziel der Diffusion – in dieser Weise – ist es, „schalleere“ Räume zu vermeiden, ebenso wie Räume, die extrem mit Geräuschen überladen sind.

In dem Bild wird der Unterschied zwischen absorbierendem Material und einem Diffuser gezeigt. Im Fall des absorbierenden Materials wird nur ein kleiner Teil der auftreffenden Energie reflektiert (kleiner Pfeil) und nur in eine Richtung. Der Rest wird absorbiert.

Im Fall eines Diffusors wird die Energie gleichmäßig und in alle Richtungen verteilt.



**Bild 10: Vergleich zwischen einem Schallabsorptions- und einem Schalldiffusionsprozess**

Schalldiffusion ist wichtig und wird besonders für Konzertsäle angewandt, aber Diffusoren können auch in Aufnahmestudios nützlich sein und, gelegentlich, in anderen Räumen. Tatsächlich erlaubt die Diffusion dem zurückgeworfenen Schall, das Ohr des Hörers in gleicher Weise aus allen Richtungen zu erreichen, wodurch der subjektive Eindruck von der akustischen Qualität der Umhüllung verbessert wird.

The calculation of the natural frequencies is out of the scope of this document and must be made according to the literature given in the bibliography. To have a first approach, the following rule is valid: There is a frequency, depending on the volume and reverberation time of a room, below which some problems with the standing waves and resonance can be expected. This frequency can be calculated according to the following formula:

where  $c$  is the sound speed in m/s,  $V$  the room volume in  $m^3$  and  $T$  the reverberation time in s.

#### A5-2.4.7 Sound diffusion

The sound diffusion consists of the dispersion, in a uniform way and in multiple directions, of the sound energy. The sound field is diffuse when at any position energy is incident from all directions with equal intensities.

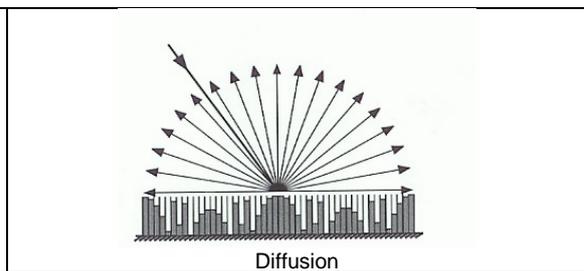
Diffusion has its origin in sound refraction, which is a theoretical concept of wave mechanics. When the wavelength of the sound is similar to the surface roughness, the resultant scattering is complex wave interference. The simplest model is that every point on the surface acts as a point source and radiates sound back into the room. The resultant pressure distribution depends on the relative phase and magnitude of all the waves received.

In a more practical dimension, diffusion is in relation with the reverberation, and sometimes the “reverberated field” is called “diffuse field”. In many cases, “reverberation” and “diffusion” do express the same concept.

For room acoustics, “diffusion” can be regarded as an acoustical way to improve the room response, it means, a method to optimise it. It is the “third tool”, with the “reflection” and “absorption” to obtain the desired acoustical performance of the room. The aim of the diffusion – in that way – is to avoid “empty” spaces of sound, as well as spaces excessively overloaded with noise.

In the figure, the difference between an absorbent material and a diffuser is shown. In case of the absorbent material, only a small part of the energy hitting it is reflected (small arrow) and only in one direction. The rest is absorbed.

In case of the diffuser, the energy is distributed uniformly and spread in all directions of reflection.



**Figure 10: Comparison between the sound absorption and the sound diffusion process**

Sound diffusion is important and applied specially for concert halls, but the diffusers can also be useful in recording studios, and, occasionally, in other rooms. Actually, the diffusion allows for the reverberated sound to reach the ear of the spectator in a similar way from all directions, increasing the subjective impression of the acoustic quality of the enclosure.

Die Entwicklung moderner Diffusoren begann in den 70er Jahren mit den Arbeiten von Schroeder. Andere Diffusoren, basierend auf anderen Geometrien, wie Kurven- oder Flankendiffusoren, sind ebenfalls produziert worden. Neuerdings sind sogar „aktive Diffusoren“ entwickelt worden.

Für einen bestimmten Diffusor wird die optimale Diffusion in einem begrenzten Frequenzband erreicht, das von den Abmessungen eines solchen Diffusors abhängt.

Es gibt eine Menge handelsüblicher Diffusoren, die den folgenden Typen zugeordnet werden können:

- Ungleichmäßige Oberflächen: wie Statuen und Stuckarbeiten in klassischen Konzertsälen.
- Zylindrische Diffusoren: normalerweise aus Holz. Sie bestehen aus einer Anzahl weicher konvexer Oberflächen mit einem Kurvenradius von ungefähr 5 Metern.
- Schroeder-Diffusoren: auch aus Holz, werden normalerweise vor Wänden oder Decken in Räumen angebracht.

In den unten stehenden Bildern werden zwei Diffusoren gezeigt.



**Bild 11: Beispiele für handelsübliche Diffusoren**

Wie oben erwähnt, begann die Theorie der Diffusoren in den 70er Jahren. Das Thema ist bis jetzt nicht abschließend behandelt und Kenntnisse sind immer noch begrenzt. Selbst zur Beschreibung des Materials gibt es nur eine sehr neue ISO-Norm (17497-1:2004), die sich mit Schalldiffusionseigenschaften von Oberflächen beschäftigt. Der zweite Teil dieser Norm, der sich mit dem Diffusionskoeffizienten, ein Maß für die Qualität eines Diffusors, beschäftigt, ist noch in der Entwicklung.

In der Tat erfordert der Entwurf von Diffusoren ein großes mathematisches Hintergrundwissen. Aus diesem Grund müssen Empfehlungen und Informationen von Fachfirmen angefordert werden, wo immer die Diffusionsphänomene benutzt werden sollen, um die Raumakustik zu verbessern.

#### **A5-2.4.8 Echos**

##### **A5-2.4.8.1 Einfache Echos**

Im Falle des Auftretens kurzer und ähnlicher Schallereignisse, wie Knalle oder Impulse in schneller Folge, kann das menschliche Ohr sie nicht unabhängig voneinander wahrnehmen, weil es sich nur mit Verzögerung einstellt. Nur wenn die Abstände größer als ungefähr 50 ms sind, können diese Erscheinungen einzeln wahrgenommen werden.

Der Knall wird deswegen als Echo wahrgenommen, wenn er von einer Wand mit einem Mindestabstand von 8,5 m von der Quelle und vom Hörer reflektiert wird. Der Ausbreitungsweg von 17 m wird in normaler Luft vom Schall innerhalb von 50 ms vollständig zurückgelegt.

The development of modern diffusers began in the 1970s, with the Schroeder works. Other diffusers based on other geometries, such as curved and fractal diffusers, have also been produced. Nowadays, even “active diffusers” have been developed.

For a determined diffuser, the optimal diffusion occurs for a frequency band limited, that depends on the dimensions of such a diffuser.

There are a lot of commercial diffusers that can be included in the following types:

- Irregular surfaces: like statues and adornments of classic concert halls.
- Cylindrical diffusers: usually made of wood. They consist of a set of smooth surfaces of convex form, with a radius of curvature of about 4 meters.
- Schroeder diffusers: also made of wood, usually placed before the walls or ceilings of rooms.

In the following figures, two diffusers are shown.



**Figure 11: Examples of commercial diffusers**

As mentioned before, the theory on diffusers began in the 70s. The subject is not as yet exhaustively developed, and knowledge is still limited. Even to characterise the materials, there is only a very recent ISO standard (17497-1:2004) dealing with the sound-scattering properties of surfaces. The second part of this standard, dealing with the “diffusion coefficient”, a measure of the diffuser quality, is being developed.

In fact, the diffuser design requires a lot of mathematical background. For this reason, recommendations and information must be required from commercial companies, wherever it is contemplated to make use of diffusion phenomena to improve room acoustics.

#### **A5-2.4.8 Echoes**

##### **A5-2.4.8.1 Simple echoes**

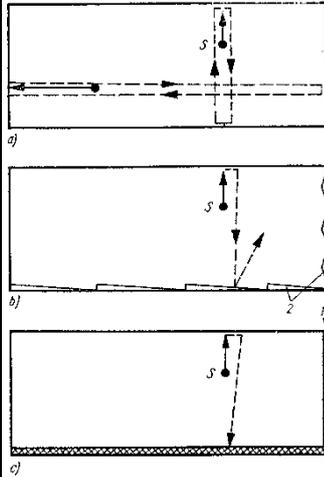
In case short and similar sound sensations, such as bangs or impulses in short succession, the human ear does not register them independently of each other because of its adjustment delay. Only if the intervals are larger than roughly 50 ms, these sensations can be registered individually.

The bang is therefore registered as an echo if it is reflected at a wall with a minimum distance of 8,5 m from the source and the listener. The propagation path of 17 m is completed in standard air inside 50 ms by the sound.

### A5-2.4.8.2 Flatterechos

Ein Echo, das mehrfach zwischen parallelen Wänden zurückgeworfen wird, nennt man Flatterecho.

Bei rechtwinkligen Bodenabmessungen ist die Gefahr von Flatterechos groß. Gemäß unten stehender Bilder müssen Flatterechos durch schräge Anordnungen von einer der einander gegenüber liegenden Wandflächen um mindestens  $5^\circ$  vermieden werden oder durch entsprechende Abteilungen oder durch Schall absorbierende Abdeckung von zumindest größeren Teilflächen der einander gegenüber liegenden Wände.



**Bild 12: Vermeidung von Flatterechos bei parallelen Wänden**

### A5-2.4.9 Akustische Konsequenzen der Raumgeometrie

Vom akustischen Gesichtspunkt aus, können wenige optimale Raumabmessungen gegeben werden. Sie sind natürlich je nach vorgesehener Nutzung, besser oder schlechter, es gibt in der Tat ungeeignete Raumabmessungen. Nichts desto weniger kann eine ideale Dimensionierung nicht angegeben werden. Jede Form hat akustische Vor- und Nachteile, die von der beabsichtigten Funktion abhängen und die beim Entwurf eines Auditoriums beachtet werden müssen. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Möglichkeiten, um die Form eines Raumes zu beeinflussen, so dass verschiedenen architektonischen Konzepten Rechnung getragen wird. Für die Wahl der Größe muss bei dem Entwurf des Raumes streng darauf geachtet werden, dass die raumakustischen Anforderungen zum frühesten möglichen Zeitpunkt die nötige Aufmerksamkeit erhalten. Durch Sekundärmaßnahmen können fundamentale Fehler in der Form nur mit Schwierigkeiten oder überhaupt nicht ausgeglichen werden.

Für sprachliche Ereignisse auf der einen Seite und für musikalische Ereignisse auf der anderen sind die Anforderungen bezüglich der Form des Auditoriums teilweise identisch, teilweise verschieden. In beiden Fällen soll die direkte Schallausbreitung den Hörer ungehindert erreichen und durch starke Erstreflexionen unterstützt werden. Beide, Sprecher und Orchester, müssen daher von reflektierenden Oberflächen umgeben sein. Zusätzlich müssen Decken und Wände in der Nähe der Schallquelle dazu dienen, die Reflexionen auf die Mitte und den hinteren Teil des Auditoriums zu zielen, um die Schalldruckpegelabnahme mit der Entfernung auszugleichen.

### A5-2.4.8.2 Flutter echoes

An echo, which is reflected several times between parallel walls, is called a flutter echo.

With rectangular floor dimensions, the danger of flutter echoes is large. According to the figures below, flutter echoes must be avoided through oblique positioning of one of the wall surfaces facing each other by at least  $5^\circ$ , through respective compartmentalisation, or through sound-absorption covering of at least substantial part areas of the walls facing each other.

- a. Mögliche Flatterechos ohne irgendwelche Gegenmaßnahmen  
*Possible flutter echoes without any counter measures*
- b. Vermeidung von Flatterechos durch schräge Anordnung der Wände (Winkel ungefähr  $5^\circ$ )  
*Avoiding flutter echoes by oblique positioning of walls (angle roughly  $5^\circ$ )*
- c. Vermeidung von Flatterechos durch Installation von absorbierenden Oberflächen  
*Avoiding flutter echoes by the installation of absorbing surfaces*

**Figure 12: Avoiding flutter echoes with parallel walls**

### A5-2.4.9 Acoustical consequences of the room geometry

From the acoustical point of view, few optimum room dimensions can be given. There are of course, dependent upon the intended use, better or worse, indeed there are unsuitable room dimensions. Nevertheless, an ideal dimensioning cannot be given. Each shape has acoustic advantages and disadvantages which depend on the intended function and which must be considered when deciding on the design of an audience room. However, a multitude of options exists for influencing the shape of the room, to cater for different architectural conceptions. As for the choice of the volume, strict attention must be paid when designing the room, that the room acoustical requirements are given appropriate attention at the earliest possible point in time. By secondary measures, fundamental mistakes in the shape can be offset only with difficulty or not at all.

For verbal events on the one side and for musical events on the other, the requirements regarding the shape of the audience rooms are partially identical, partially different. In both cases, the direct sound propagation shall reach the listener unhampered and shall be supported by strong initial reflections. Both speaker and orchestra must therefore be surrounded by reflecting surfaces. Additionally, ceilings and walls near the sound source must serve to aim the reflections into the middle and the back of the audience area, to offset the sound pressure level decrease by distance.

Um das räumliche Schallerlebnis zu verbessern, ist es für musikalische Darbietungen wichtig, dass die seitlichen Reflexionen ausreichen. Außerdem sollte sich in Konzertsälen ein starkes Hallfeld entwickeln können. Das bedeutet, dass diffuse Mehrfachreflexionen in starkem Maße möglich sein sollen. Die abschließliche Ausrichtung aller Raumbegrenzungsflächen um Reflexionen in die Richtung auf die Zuhörerschaft zu erhalten, welches die Hauptaufgabe für sprachliche Darbietungen ist, wäre in Konzertsälen ein Fehler, da die Schallabstrahlung, die die Hörer trifft, absorbiert wird und deswegen für die Entwicklung eines Hallfeldes verloren ist.

Für sprachliche Darbietungen, besonders in großen Auditorien, werden breite Formen bevorzugt, da sie einen kürzeren mittleren Abstand zwischen Sprecher und Auditorium ermöglichen. Die Schallrichtung in die entfernten Teile des Auditoriums ist dann im Prinzip durch eine entsprechend entworfene, relativ niedrige Decke sichergestellt.

Für Konzertsäle ist im Gegensatz dazu der Abstand zwischen Orchester und Zuhörer nicht so wichtig, da der vorhandene Schalldruckpegel größer ist. Bezüglich der wichtigen seitlichen Wandreflexionen sind deswegen engere Saalformen geeigneter. Vor der Deckenreflexion sollten seitliche Wandreflexionen den Hörer erreichen, so dass sie nicht durch die Deckenreflexion verdeckt werden. Durch eine entsprechend hohe Decke wird das große Raumvolumen pro Sitz erreicht.

Aus diesem Grund sind für Konzertsäle rechteckige Grundrisse geeignet, wenn das Orchesterpodium an einer der kurzen Seiten des Raumes platziert wird. Je größer das Verhältnis Höhe zu Breite in diesen Sälen ist, desto besser wird ihre akustische Qualität eingeschätzt. Wenn dagegen das Podium vor einer der langen Seiten des Raumes angeordnet wird, ist ein rechteckiger Grundriss für Konzertsäle ungeeignet, da die kräftigen seitlichen Reflexionen fehlen, aber geeignet für sprachliche Darbietungen.

Bei rechtwinkligen Grundrissen ist die Gefahr des Auftretens von Flatterechos besonders groß. Gemäß Bild 12 müssen Flatterechos durch schräge Anordnung der einander gegenüber liegenden Wände um mindestens 5°, durch entsprechende Abteilungen oder durch Schall absorbierende Abdeckungen von zumindest einem größeren Teil der Oberfläche einer der beiden einander gegenüber liegenden Wände vermieden werden.

Für Räume mit quadratischem Grundriss sind die verschiedenen Podiumspositionen gemäß unten stehender Bilder in Gebrauch. Während für kleinere Säle (für bis zu 500 Zuhörer) alle möglichen Podiumspositionen sowohl für sprachliche als auch für musikalische Darbietungen geeignet sind, fehlt bei größeren Räumen für die Möglichkeiten c) und d) die seitliche Reflexion für den hinteren Bereich des Saals. Andererseits ist die Unterstützung der Schallabstrahlung vom Podium durch kurzzeitige Reflexionen mit diesen beiden Möglichkeiten besonders gut, so dass sie für eine Schallquelle mit geringen räumlichen Abmessungen vorteilhaft sind, wenn große Klarheit und Transparenz gefordert sind (Sprecher, Sänger, Soloinstrumente).

To improve the spatial sound sensation, it is important for rooms for musical presentations that the lateral reflections suffice. Additionally, in a concert audience a powerful reverberation field should be able to form. That means that diffuse multiple reflections should be possible to a high extent. The sole adjustment of all room-limiting surfaces to obtain reflections in the direction of the audience, which is the principal task in rooms for oral presentations, would be a mistake for concert halls, since the sound radiation hitting the audience is absorbed and therefore lost for the development of a reverberation field.

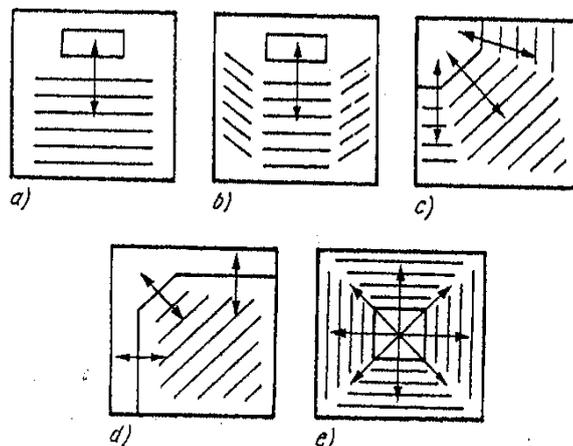
For oral presentations, especially in large audiences, wide forms are to be preferred, since they allow for a shorter middle distance between speaker and audience. The sound direction in the distant parts of the audience is then principally achieved by an appropriately designed, relatively low ceiling.

For concert halls on the contrary, the distance between orchestra and audience is not so important, since the sound pressure level available is bigger. Regarding the important lateral wall reflections, therefore, narrower forms of the hall are better suited. In advance of ceiling reflections, lateral wall reflections should reach the listener, so that they are not masked by the ceiling reflections. With an appropriately high ceiling, the large room volume per seat is obtainable.

Rectangular floor dimensions are suited for concert halls therefore, if the orchestra podium is placed at one short side of the room. The larger the proportion height to width is in these halls, the better is deemed their room acoustic quality. When positioning the podium in front of a long side of the room, a rectangular floor dimension for concert halls is unsuitable due to the missing powerful lateral reflections, but suitable for verbal presentations.

With rectangular floor dimensions, the danger of the occurrence of flutter echoes is specifically large. According to Figure 12, flutter echoes must be avoided by oblique positioning of walls facing each other by at least 5°, through respective compartmentalisation or through sound-absorption covering of at least a major part of the surfaces of one of the walls facing each other.

For rooms with square floor dimensions, the different podium positions given in the figure below are in use. Whilst for smaller halls (up to 500 listeners) all possible podium positions are suitable for both, verbal and musical presentations, for larger rooms in the possibilities c) and d), the lateral reflections for the back area of the hall are missing. On the other hand, the support of the sound radiation from the podium through short-time reflections is specifically good with these two possibilities, so that they are of advantage for a sound source with small spatial dimensions, if great clarity or transparency are required (speaker, singer, instrumental solists).



**Bild 13: Verschiedene Positionen des Podiums in Räumen mit quadratischem Grundriss**

**Figure 13: Different positions of the podium in rooms of square dimensions**

Für Räume mit polygonalen Grundrissen bestehen ähnliche Möglichkeiten der Nutzung wie für quadratische Grundrisse. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass keine Rundumreflexionen entlang der Wände entstehen (Flüstergallerieeffekt).

Diese Rundumreflexionen drohen besonders bei Grundrissen mit gebogenen Begrenzungsoberflächen zu entstehen. Durch Sekundärmaßnahmen müssen diese unerwünschten Folgen ausgeglichen werden (z. B. abdeckende Glaswände senkrecht zu den Raumwänden).

Zusätzlich führen konkave Oberflächen zu unerwünschten Schallkonzentrationen, die ebenfalls Sekundärmaßnahmen erforderlich machen (Strukturierung, Abteilung, Auflösung in Teiloberflächen).

## A5-2.5 Hintergrundgeräusch

### A5-2.5.1 Allgemeines

Die Benutzung eines Raumes für einen bestimmten Zweck kann zu einer Anforderung für die Angabe eines maximal zulässigen Hintergrundgeräusches führen. Zum Beispiel sollte eine Kirche ruhiger sein als ein Klassenzimmer.

Es gibt viele Empfehlungen zu dem maximal zulässigen Hintergrundgeräusch. Diese sind normalerweise in Form von Kurven mit dem maximalen Pegel für jedes Oktavband angegeben, abhängig von den akustischen Anforderungen an den betrachteten Raum oder Bereich.

Nachstehend werden einige Kommentare zu diesen Kurven gegeben.

Die einfachste Empfehlung für das maximal zulässige Hintergrundgeräusch ist, den maximal zulässigen A-bewerteten Schalldruckpegel (dB(A)) anzugeben. Eine solche Angabe reicht meist aus, aber die unten stehenden Empfehlungen sind genauer.

**NC** (Noise Criterion)-Kurven wurden 1957 definiert. Später wurden sie durch **PNC** (Preferred Noise Criterion) ersetzt, jedoch später wieder eingeführt. Die **NCB** (Balanced Noise Criterion, ANSI S12.2-1995)-Kurven sind die einzigen heutzutage im Gebrauch befindlichen, wenn es um die Bestimmung der optimalen Geräuschumgebung geht. Zur Bestimmung der Sprachverständlichkeit in Räumen kann auch NC genommen werden.

Die **RC** (Room Criterion)-Kurven werden in den USA benutzt gemäß der nationalen amerikanischen Norm S12.2-1995, aber sie haben keine praktische Anwendung in Europa.

Das NR (Noise Rating) wurde durch ISO in der ersten Version der Norm ISO 1996:1971 empfohlen. Bei den Neuauflagen dieser Norm wurde es nicht mehr mit aufgenommen. In der Ursprungsversion wurde NR als Alternative zu der dB(A)-Methode gegeben, um einige Empfehlungen zu den Grenzen von Lärmbelästigung zu machen. Aber jeder Nutzer (z. B. Verwaltungen, ...) könnte seine eigenen Kriterien angeben. Sie waren daher nicht, an sich, eine Empfehlung (sie wie sie heutzutage benutzt werden!).

Heute, obwohl die neue ISO 1996 das nicht einschließt, geben eine Anzahl anderer ISO-Normen Empfehlungen gemäß der NR-Kurven, sie sind in Europa in verbreiteten Gebrauch.

### A5-2.5.2 Balanced Noise Criterion (NCB)-Kurven

Diese Bewertungskurven müssen gewählt werden, wenn Spezifikationen geschrieben oder wenn die Eignung von dem Pegel des Hintergrundgeräusches in einem Raum beurteilt werden soll. Tatsächlich sind diese Kurven eine überarbeitete Version der Noise Criterion (NC)-Kurven, die auf bewohnte Räume mit eingeschalteten HVAC- (Heizungs-, Belüftungs- oder Klima-) Anlagen anwendbar sind.

For rooms with polygonal room dimensions, similar possibilities for utilisation exist as for square forms. However, attention must be paid that no rotary reflections occur along the walls (whispering gallery effect).

These rotary reflections threaten to occur specifically with floor dimensions with bent limitation surfaces. Through secondary measures, these undesired effects must be offset (e. g. masking glass walls vertical to room walls).

Additionally, concave surfaces lead to undesired sound concentrations which also require secondary measures to be taken (structuring, compartmentalisation, dissolving into partial surfaces).

## A5-2.5 Background noise

### A5-2.5.1 General

The use of a space for a particular purpose may impose a requirement for the specification of a maximum tolerable background noise. For example, a church should be quieter than a classroom.

There are many recommendations regarding the maximum tolerable background noise. Normally, these are given in the form of curves with the maximum level for each octave band, depending on the acoustical requirements of the room or space considered.

Below, some comments on these curves are given.

The simplest recommendation for maximum acceptable background noise is to specify the maximum acceptable A-weighted noise pressure level (dB(A)). Such specification is often sufficient, but more accurate are the recommendations below.

**NC** (Noise Criterion) curves were defined in 1957. Later, they were replaced by the **PNC** (Preferred Noise Criterion), but finally they were restored. The **NCB** (Balanced Noise Criterion, ANSI S12.2-1995) curves are the only ones in use nowadays when it comes to the determination of the best noise ambience. To determine the intelligibility of speech in a room, the NC is also valid.

The **RC** (Room Criterion) curves are used in the USA, according to the American national standard S12.2-1995, but they have no practical application in Europe.

The NR (Noise Rating) was recommended by ISO in the first version of the ISO standard 1996:1971. In the revisions of that standard, it has not been included. In the original version, NR was given as alternative to the dB(A)-method in order to establish some recommendations for the limitation of noise annoyance. But each user (e. g. administration, ...) could give its own specific criteria. They were not, in themselves, a recommendation (as they are used nowadays!).

Today, even if the new ISO 1996 does not include it, many other ISO standards give recommendations according to NR curves, and they are widely used in Europe.

### A5-2.5.2 Balanced Noise Criterion (NCB) curves

These criterion curves must be chosen when writing specifications or judging the acceptability of the level of background noise in a room. In fact, these curves are the revised versions of Noise criterion (NC) curves, applicable to occupied rooms with HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) systems in operation.

Anmerkung: Pegel im Bereich A oder darüber deuten mit hoher Wahrscheinlichkeit eindeutig feststellbare Vibrationen in Gipskartonwänden an. Bereich B deutet eine geringe Wahrscheinlichkeit an.

Note: Levels in region A or above indicate high probability of clearly noticeable vibrations in gypsum board structures. Region B indicates low probability.

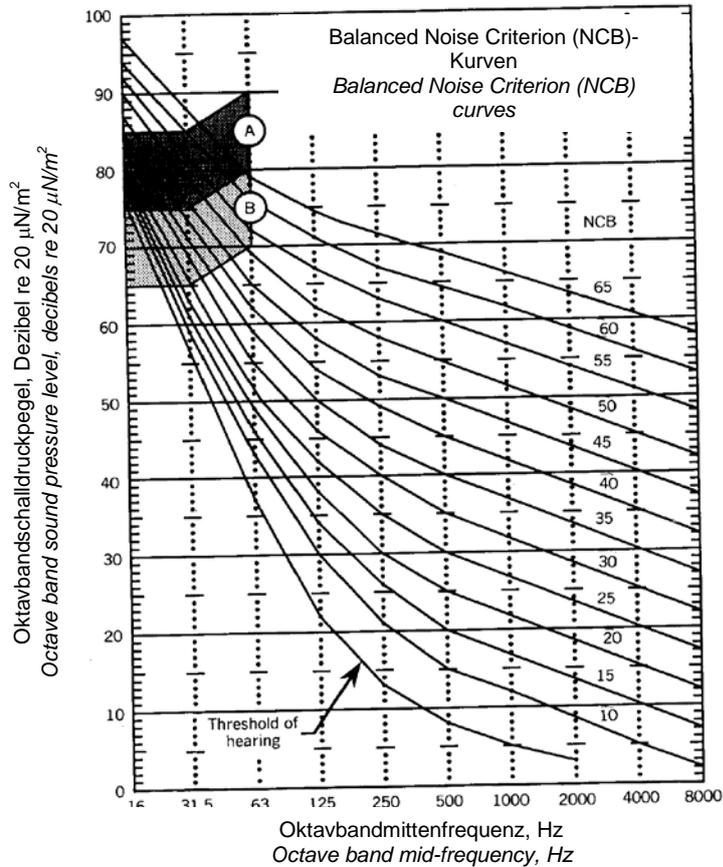


Bild 14: NCB-Kurven

Figure 14: NCB curves

In der unten stehenden Tabelle sind für verschiedene Anwendungen eine Reihe von zulässigen NCB-Kurvenwerten mit den zugehörigen Hintergrundgeräuschdruckpegeln in dB(A) angegeben. Das untere Ende des Bereichs sollte angestrebt werden, um eine gute Sprachverständlichkeit oder Musikhörbarkeit sicherzustellen.

In the table below, a number of acceptable NCB curve values with the associated background noise pressure levels in dB(A) is shown for different applications. The lower end of the range should be selected to guarantee a good speech communication or listening to music.

Art des Raumes <i>Type of space</i>	NCB-Kurve <i>NCB curve</i>	ca. dB(A) <i>approximate dB(A)</i>
Sende- und Aufnahmestudios (Distanzmikrofone als Tonaufnehmer benutzt) <i>Broadcast and recording studios (distant microphones pickup used)</i>	10	18
Konzertsäle, Opernhäuser, Vortragssäle <i>Concert halls, opera houses, recital halls</i>	10 – 15	18 – 23
Große Auditorien, Theater und Kirchen <i>Large auditoriums, drama theatres and churches</i>	< 20	28
Sende-, Fernseh- und Aufnahmestudios (Nahmikrofone als Tonaufnehmer benutzt) <i>Broadcast, television and recording studios (close microphones pickup used)</i>	< 25	33
Kleine Auditorien, kleine Theater oder Kirchen, große Versammlungs- und Sitzungsräume, Chefbüros und Konferenzräume für 50 Personen <i>Small auditoriums, small theatres or churches, large meeting and conference rooms, executive offices and conference rooms for 50 people</i>	< 30	38
Zum Schlafen, Ausruhen, Erholen <i>For sleeping, resting, relaxing</i>	25 – 40	38 – 48
Private Büros, Konferenzräume, Klassenräume, Bibliotheken <i>Private offices, small conference rooms, classrooms, libraries</i>	30 – 40	38 – 48
Wohnzimmer <i>Living rooms</i>	30 – 40	38 – 48
Große Büros, Empfangsbereiche, Restaurants <i>Large offices, reception areas, restaurants</i>	35 – 45	43 – 53
Arbeitsplätze in Laboratorien, Entwicklungs- und Zeichenräume <i>Laboratory workspaces, engineering and drafting rooms</i>	40 – 50	48 – 58
Werkstätten für leichte Instandsetzung, Schalt- und Kontrollräume, Räume mit Büro- und Computerausrüstung <i>Light maintenance shops, industrial plant control rooms, office and computer equipment rooms</i>	45 – 55	53 – 63

**Tabelle 7: Maximal zulässiges Hintergrundgeräusch für verschiedene Zwecke (NCB)**

**Table 7: Maximum background noise acceptable for different purposes (NCB)**

#### Benutzung von NCB-Kurven

Das Oktavbandspektrum des Geräusches ist normalerweise vor der Belegung gemessen, während alle mechanischen Systeme arbeiten. Wenn der Raum ein privates Büro oder Sitzungsraum ist, kann das gemessene Spektrum direkt zur Beurteilung benutzt werden. Wenn der Raum ein allgemeines Büro oder ein Zeichenraum ist, wo es merkbare Arbeitsgeräusche gibt, muss das Geräusch der erwarteten Aktivitäten hinzugefügt werden.

Für die Entscheidung der Eignung für die Sprachverständlichkeit wird der SIL (Sprach-Störschall-Pegel) dadurch bestimmt, dass die Schallpegel in den Frequenzbändern 500 Hz bis 4000 Hz gemittelt werden. Wenn die so ermittelte aufgerundete Zahl gleich oder unterhalb des vorgegebenen NCB-Wertes liegt, ist die Anforderung an die Sprachverständlichkeit erfüllt.

Diese Kurven sind auch anwendbar, wenn man bestimmen will, ob „Rumpel“- oder „Zisch“-Geräusche vorkommen (dies ist besonders nützlich für Räume mit Heizungs-, Belüftungs- oder Klimaanlage).

1. Addiere 3 dB zum vorher bestimmten SIL-Wert, um einen NCB-YY-Wert zu erhalten. Die Kurve (aus Bild 14), zum nächstliegenden Dezibelwert interpoliert, wird mit dem gemessenen Geräuschspektrum eingezeichnet. Wenn der Pegel in irgendeinem Oktavband mit einer Mittenfrequenz unter 1000 Hz oberhalb der NCB-YY-Kurve liegt, liegen Rumpelgeräusche vor. In diesem Fall ist der Raum brauchbar für sprachliche Kommunikation, aber die Pegel, die oberhalb der NCB-YY-Kurve liegen, müssen vermindert werden.
2. Wenn der SIL und die Rumpelprüfung befriedigend ausfallen, muss diejenige NCB-ZZ-Kurve bestimmt werden, die die beste Übereinstimmung mit den drei Frequenzbändern von 125 Hz bis 500 Hz aufweist, jeweils zum nächstliegenden Dezibelwert interpoliert. Wenn die Pegel in irgendeinem der Bänder mit Frequenzen von 1000 Hz oder mehr über der NCB-ZZ-Kurve liegen, wird das Spektrum als „zischend“ bewertet und die Pegel sollten um den angezeigten Wert reduziert werden.

#### A5-2.5.3 Noise Rating (NR)-Kurven

Wie zuvor erklärt, waren die NR-Kurven ursprünglich nicht als „Grenzwerte“ vorgesehen, auch wenn sie heutzutage als solche benutzt werden (A5-2.5.1).

#### Use of NCB curves

The octave band spectrum of the noise is usually measured before occupancy with all mechanical systems operating. If the space is a private office or conference room, this measured spectrum may be used directly for the rating. If the space is a general office or drafting room, where there is appreciable activity noise, the noise of the expected activities must be added.

For the determination of acceptability for speech communication, the SIL (Sound Interference Level) is determined by averaging the noise levels in to 500 Hz to 4000 Hz frequency bands. If the rounded integral number so determined is equal or less than the NCB value specified, the speech communication requirement has been satisfied.

These curves are also valid to determine whether “rumble” or “hiss” exist (this is specifically useful in rooms with HVAC systems).

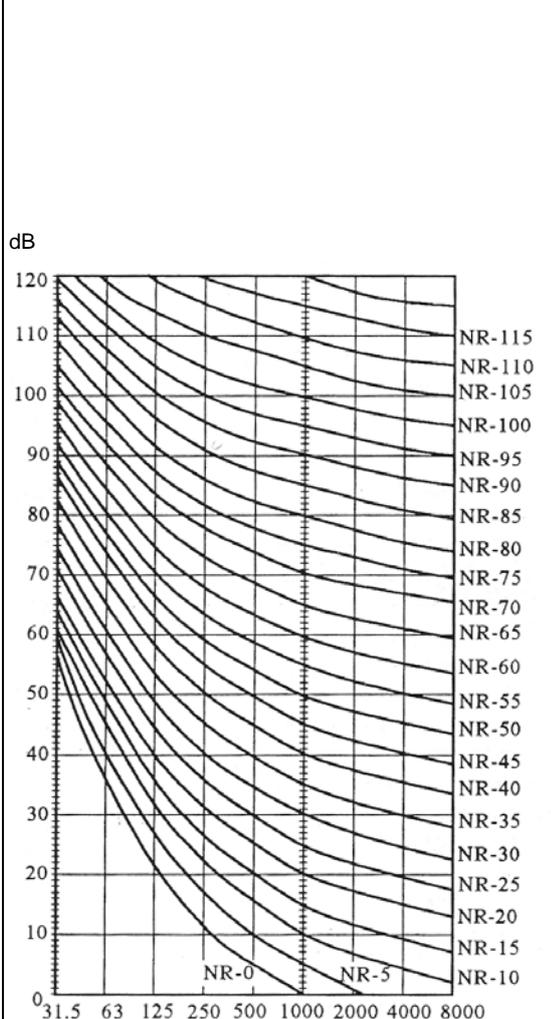
2. Add 3 dB to the SIL determined before to obtain an NCB-YY value. The curve (from Figure 14), interpolated to the nearest decibel, is plotted with the measured noise spectrum. If the level in any octave band with a mid-frequency below 1000 Hz lies above the NCB-YY curve, the noise has rumble. In this case, the room is satisfactory for speech communications, but the levels that are over NCB-YY must be lowered.
2. If the SIL and rumble tests are satisfactory, the NCB-ZZ curve that yields the best fit to the three bands from 125 Hz to 500 Hz must be determined, interpolating to the nearest decibel. If the levels in any of the bands with frequencies of 1000 Hz or greater lie above the NCB-ZZ curve, the spectrum is judged hissy and the levels should be reduced by the amounts indicated.

#### A5-2.5.2 Noise Rating (NR) curves

As explained before, the NR curves at the origin were not intended to be used as “limit values”, even if today they are used in that way (A5-2.5.1).

Die „richtige“ Verwendung der Kurven erfordert das Messen des Oktavbandgeräusches in dB und, wenn möglich, des Dauergeräusches. In anderen Fällen sollten einige Korrekturen gemäß der ursprünglichen ISO 1996:1971 vorgenommen werden, aber nicht gemäß der neuesten ISO 1996. Bei der tatsächlichen Anwendung werden die Messungen „mehr oder weniger“ kontinuierlich vorgenommen (das bedeutet äquivalente Pegel oder ähnliche) in den Oktavbändern, und in vielen Fällen werden keine Korrekturen vorgenommen. Im Falle der Fluktuation des Geräusches oder im Falle von hohen tonalen Anteilen sind derartige Korrekturen notwendig.

Die Benutzung der Kurven, nach Messung des Schallspektrums (in Oktaven) ist sehr einfach: Es ist nur erforderlich, die Werte (dB) für jede Oktave in die untere Grafik einzuzichnen und dann die NR-Kurve zu nehmen, die eben oberhalb aller Punkte liegt.



**Bild 15: Noise Rating Kurven**

Zur Interpretation der Gültigkeit der Geräusche für den vorgesehenen Zweck werden einige Tabellen mit Empfehlungen herangezogen.

Nachstehend eine derartige Tabelle. Wie oben erklärt, werden NR-Kurven als Grundlage von solchen Empfehlungen gegeben, sind aber nicht selber Empfehlungen. Verschiedene Tabellen mit verschiedenen Empfehlungen können gefunden werden. Eine solche Empfehlung ist in Tabelle 8 gezeigt. Diese Art von Empfehlungen muss mit Vorsicht gehandhabt werden (siehe auch Tabellen 7 und 16).

Natürlich sind die NR-Werte für vergleichbare Aktivitäten sehr ähnlich, aber nicht immer identisch.

The “right” use of the curves requires measurements of octave band noise in dB, if possible, of continuous noise. In other cases, some corrections should be made, according to the original ISO 1996:1971, but not according to the last ISO 1996. In the real job, the measurements are taken “more or less” continuous (that means equivalent level or similar), in octave bands, and no corrections are being made in many cases. In case of fluctuations of the noise, or in case of high tonal components, such corrections are necessary.

The use of the curves, after measuring the noise spectrum (in octaves) is very easy: It is only necessary to plot the values (dB) for each octave in the graphic below, and then take the NR curve just over all the points.

NR-Wert NR value	Oktavbänder (Hz) Octave bands (Hz)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NR 0	35,5	22,0	12,0	4,8	0,0			
NR 5	39,4	26,3	16,6	9,7	5,0	1,6		
NR 10	43,4	30,7	21,3	14,5	10,0	6,6	4,2	2,3
NR 15	47,3	35,0	25,9	19,4	15,0	11,7	9,3	7,4
NR 20	51,3	39,4	30,6	24,3	20,0	16,8	14,4	12,6
NR 25	55,2	43,7	35,2	29,2	25,0	21,9	19,5	17,7
NR 30	59,2	48,1	39,9	34,0	30,0	26,9	24,7	22,9
NR 35	63,1	52,4	44,5	38,9	35,0	32,0	29,8	28,0
NR 40	67,1	56,8	49,2	43,8	40,0	37,1	34,9	33,2
NR 45	71,0	61,1	53,6	48,6	45,0	42,2	40,0	38,3
NR 50	75,0	65,5	58,5	53,5	50,0	47,2	45,2	43,5
NR 55	78,9	69,8	63,1	58,4	55,0	52,3	50,3	48,6
NR 60	82,9	74,2	67,8	63,2	60,0	57,4	55,4	53,8
NR 65	86,8	78,5	72,4	68,1	65,0	62,5	60,5	58,9
NR 70	90,8	82,9	77,1	73,0	70,0	67,5	65,7	64,1
NR 75	94,7	87,2	81,7	77,9	75,0	72,6	70,8	69,2
NR 80	98,7	91,6	86,4	82,7	80,0	77,7	75,9	74,4
NR 85	102,6	95,9	91,0	87,6	85,0	82,8	81,0	79,5
NR 90	106,6	100,3	95,7	92,5	90,0	87,8	86,2	84,7
NR 95	110,5	104,6	100,3	97,3	95,0	92,9	91,3	89,8
NR 100	114,5	109,0	105,0	102,2	100,0	98,0	96,4	95,0
NR 105	118,4	113,3	109,6	107,1	105,0	103,1	101,5	100,1
NR 110	122,4	117,7	114,3	111,9	110,0	108,1	106,7	105,3
NR 115	126,3	122,0	118,9	116,8	115,0	113,2	111,8	110,4
NR 120	130,3	126,4	123,6	121,7	120,0	118,3	116,9	115,6

**Figure 15: Noise Rating curves**

The interpretation of the validity of the noise for an intended purpose is made according to some tables with recommendations.

Below is one such table. As explained above, the NR curves are given as basis of such recommendations, but are not in themselves a recommendation. Different tables with different recommendations may be found. One of the recommendations is shown in Table 8. This kind of recommendation must be handled with care (see also Tables 7 and 16).

Of course, the NR values for the same activity will be very similar, but not always the same.

Wegen all der oben beschriebenen Einschränkungen gehen mit der Benutzung von solchen Kurven eine Reihe von Problemen einher. Womöglich ist es interessant, die Benutzung anderer Kurven zu versuchen (NCB – besser als NC, besser bekannt, aber alter – oder sogar RC).

Because of all the limitations explained above, the use of such curves presents a lot of problems. Perhaps it should be interesting to try and use other curves (NCB – better than the NC, better known, but older – of even RC).

Art des Raumes <i>Type of space</i>	NR-Kurve <i>NR curve</i>
Betrieb <i>Workshop</i>	60-70
Büro mit Maschinen <i>Office with mechanisms</i>	50-55
Schwimmbad, Sporträume <i>Swimming pool, sport rooms</i>	40-50
Restaurant, Bar <i>Restaurant, bar</i>	35-45
Chefbüro, Bibliothek <i>Executive office, library</i>	30-40
Kino, Krankenhaus, Kirche, kleine Konferenzräume <i>Cinema, hospital, church, small conference rooms</i>	25-35
Klassenräume, Fernsehstudios, große Konferenzräume <i>Classrooms, TV studios, large conference rooms</i>	20-30
Konzertsäle, Theater <i>Concert halls, theatres</i>	20-25
Räume für Audiometrie <i>Rooms for audiometry</i>	10-20

**Tabelle 8: Empfohlene NR-Werte für Hintergrundgeräusche in Räumen, bezogen auf die Raumnutzung**

**Table 8: Recommended NR values for background noise in rooms, in relation with activity**

#### A5-2.6 Andere akustische Parameter

#### A5-2.6 Other acoustic parameters

##### A5-2.6.1 Allgemeines

##### A5-2.6.1 General

Auf dem Gebiet der subjektiven Raumakustik haben intensive Forschungsaktivitäten in den 60er und 70er Jahren zu einem hohen Maß an Übereinstimmung geführt bezüglich:

In the field of subjective room acoustics, intense research activity in the 60<sup>th</sup> and 70<sup>th</sup> has resulted in a high degree of consensus regarding:

- welche Aspekte für die Empfindung eines Hörers von der akustischen Qualität eines Raumes wichtig sind,
- wie diese Aspekte durch die akustischen Parameter des Raumes objektiv gemessen werden können.

- what aspects are important in the listener's perception of room acoustic quality,
- how these aspects can be measured objectively by means of room acoustic parameters.

Es wurde eine Anzahl neuer objektiver Parameter entwickelt, die neben der klassischen Nachhallzeit subjektiv relevant sind. Jedenfalls ist ihr hauptsächlichster Vorteil ihre gute Korrelation zur subjektiven Bewertung der akustischen Qualität eines Raumes.

A set of new objective parameters has been developed, which are subjectively relevant besides the classical reverberation time. However, their main advantage is their good correlation to the subjective judgement of the acoustic quality of a room.

Diese neuen Parameter sind sehr schwer vorauszusagen, außer wenn teure Anzeige- oder Computermodelle benutzt werden.

These new parameters are very difficult to predict, unless expensive scale or computer models are applied.

Der Hauptgrund ihrer schweren Vorhersagbarkeit ist ihre große Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen der Energie im Bereich der frühen Reflexionsfolgen. Sie sind damit von der Wahl des Messpunktes im Raum und der Raumgeometrie abhängig.

The main reason for their difficult predictability is that they are more sensitive to changes in the early reflection sequence in terms of energy, and thus are highly dependent on the choice of measurement position and on the room geometry.

Die allgemein angewendete Praxis, die Verzögerungszeiten der einzelnen Reflexionen zu betrachten, reicht für die Abschätzung dieser neuen Maße und als Hilfe für Architekten bei der Wahl der Raumform nicht aus. Wir müssen wissen, wie – und wie viel – der Entwurf geändert werden könnte oder sollte, bevor bedeutende Änderungen in diesen objektiven Parametern auftreten.

The commonly used practice of looking at delay times of single reflections is not sufficient for estimating these new measures and for guiding architects on the choice of room shape. We need to know how – and how much – the design may or should be changed before significant changes in the objective parameters appear.

Offensichtlich ist diese Kenntnis maßgeblich für die Wahl der Abmessungen einer neuen Halle.

Obviously, this knowledge is essential for the choice of a geometry for a new hall.

Auf der anderen Seite können wir mehr als 15 Parameter angeben, die die akustische Qualität eines Raumes beeinflussen.

On the other hand, we can collect more than 15 parameters influencing a room's acoustical quality.

Die Fragen sind:

The questions are:

- Was ist die Mindestanzahl von Kriterien, die benötigt werden, um die umfassende akustische Qualität eines Raumes zu repräsentieren?
- Welches sind diese Kriterien und wie kann man sie bewerten, um sie in Beziehung zum Hörerlebnis zu setzen?

- What is the minimum number of criteria needed to represent the global acoustical quality of a room?
- What are these criteria, and how can we weight them to correlate with the hearing pleasure?

Fünf bekannte Autoren haben versucht, diese Fragen zu beantworten, und ihre Überlegungen basieren auf der Prüfung von Räumen, die von ihnen als sehr gut eingeschätzt wurden. In Tabelle 9 ist die Häufigkeit angegeben, mit der das betrachtete Kriterium angegeben worden ist. Wir müssen feststellen, dass vier der Autoren auch die Nachhallzeit als ein wichtiges Kriterium angegeben haben.

Five well-known authors tried to answer these questions and their studies were based on the examination of rooms, judged very good by all of them. In Table 9, we note the number of times the considered criterion was mentioned. We must note that four authors mentioned also the reverberation time as an important criterion.

Alle für die Bewertung eines Raumes benutzten Parameter, außer Nachhall und Verständlichkeit, können in drei Kategorien eingeordnet werden:

All the parameters used to qualify a room, other than reverberation and intelligibility, can be put into three categories:

- Klarheitskriterien,
- Räumlichkeits- (Raumeindruck) Kriterien,
- Harmonie- und Gleichmäßigkeitskriterien.

- clarity criteria,
- spaciousness (room impression) criteria,
- harmony and homogeneity criteria.

Die unten stehende Tabelle gibt eine Einteilung dieser Kriterien in ihrer Relation zum subjektiven Eindruck.

The table below gives a classification of these criteria, in relation to a subjective impression.

Kategorie des subjektiven Faktors <i>Class of subjective factor</i>	Name	Symbol	Anzahl der Erwähnungen durch 5 Autoren <i>Number of mentions by 5 authors</i>
Klarheit <i>Clarity</i>	Deutlichkeitsmaß (für Sprache) <i>Distinctness (for speech)</i>	$C_{50}$	
	Klarheitsmaß (für Musik) <i>Clarity (for music)</i>	$C_{80}$	2
	Dauer der Anfangszeit <i>Initial time period</i>	$t^i$	2
Räumlichkeit <i>Spaciousness</i>	seitliche Wirksamkeit <i>lateral efficiency</i>	LE	1
	seitlicher Energieanteil <i>lateral energy fraction</i>	LEF oder / or LF	1
	Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient <i>Interaural cross-correlation coefficient</i>	IACC	2
Harmonie und Gleichmäßigkeit <i>Harmony and homogeneity</i>	Bassverhältnis <i>Bass ratio</i>	BR	1
	Frühe Abklingzeit <i>Early decay time</i>	EDT oder / or EDT <sup>1</sup>	3
	Pegel (Stärke) <i>Level (strength)</i>	L	4

**Tabelle 9: Verhältnis zwischen raumakustischen Kriterien und der subjektiven Empfindungen**

**Table 9: Relation between room acoustic criteria and subjective impression**

In den nachstehenden Kapiteln werden die in der Tabelle erwähnten Kriterien kurz vorgestellt. Alle diese Faktoren können nur von Spezialisten angewendet werden. Bauausführende jedoch, die mit Raumakustik befasst sind, müssen die Terminologie kennen und die Bedeutung der Ausdrücke, die in diesen Überlegungen verwendet werden.

In the following paragraphs, we make a short presentation of the criteria mentioned in the table. All these factors are to be used by specialists, but the contractors working in room acoustics must know the terminology and the meaning of terms used in these studies.

In den unten stehenden Gleichungen drückt der Ausdruck  $E_{t_1}^{t_2}$  die Energie in dem Zeitabschnitt  $t_1$  bis  $t_2$  in ms aus, gemessen ab der Ankunft des Direktschalls. Zum Beispiel  $E_0^{50}$  bedeutet die Energie, die zwischen 0 ms und 50 ms auftritt.

In the equations given below, the expression  $E_{t_1}^{t_2}$  represents the energy within the limits of time  $t_1$  to  $t_2$  counted in ms from time of arrival of the direct sound. For example,  $E_0^{50}$  corresponds to the energy from time 0 ms to time 50 ms.

#### A5-2.6.2 Klarheitskriterien

#### A5-2.6.2 Clarity criteria

##### A5-2.6.2.1 Deutlichkeitsmaß $C_{50}$

##### A5-2.6.2.1 Distinctness $C_{50}$

Es entspricht dem Energieverhältnis zwischen dem direkten Feld, verstärkt durch die ersten Reflexionen (von 0 – 50 ms) und dem Gesamtfeld:

It corresponds to the energy ratio between the direct field, completed by the first reflections (from 0 – 50 ms) and the total field:

$$C_{50} = 10 \log \left( E_0^{50} / E_0^{\infty} \right)$$

Der Wert 50 ms scheint eine brauchbare Grenze für gute Sprachverständlichkeit zu sein.

The value 50 ms seems to be the useful limit for a good intelligibility of speech.

Ein hoher Absolutwert bedeutet, dass die meiste reflektierte Energie sehr früh ankommt – wodurch es zu der Klarheit des Schalls beiträgt –, während ein niedriger Absolutwert bedeutet, dass die Energie lange nach dem Direktschall eintrifft – und dadurch einen Nachhalleindruck erzeugt.

A high absolute value means that most of the reflected energy arrives early – whereby it adds to the clarity of the sound –, while a low absolute value means that it arrives long after the direct sound – and so provides reverberation impression.

**A5-2.6.2.2 Klarheitsmaß  $C_{80}$** 

Für Musik wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis (wirkungsvolles Feld / diffuses Feld) wichtiger ist. Das Klarheitsmaß ist das Verhältnis, in Dezibel ausgedrückt, der Energie, die in den ersten 80 ms eines Schallimpulses an der Hörerposition auftritt, geteilt durch die Schallenergie nach 80 ms. Der Divisor ist ungefähr die Gesamtenergie des Nachhalls. Das Symbol bedeutet den Durchschnitt der  $C_{80}$ -Werte in den 500, 1000 und 2000 Hz-Oktavbändern.  $C_{80}$  wird mit folgender Gleichung angegeben:

$$C_{80} = 10 \log \left( E_0^{80} / E_{80}^{\infty} \right)$$

Ein hoher Wert für  $C_{80}$  bedeutet einen großen Anteil früher Energie und hohe subjektive Klarheit, während ein niedriger Wert einen unklaren und verschwommenen Klang andeutet. Auf Sitzplätzen nahe der Bühne ist  $C_{80}$  normalerweise höher als der Durchschnittswert aller Sitzpositionen. In Bereichen mit geringer Deckenhöhe über den Sitzen (auf und unter den Rängen) ist  $C_{80}$  normalerweise höher wegen des niedrigen Pegels der an solchen Plätzen ankommenden späteren Schallreflexionen.

**A5-2.6.2.3 Anfangszeitlücke  $t_i$** 

Sie ist der Unterschied zwischen der Ankunftszeit des direkten Schalls an der Hörerposition und der Zeit, zu der die ersten Wandreflexionen ankommen. Dieser Faktor hat engeren Bezug zur Sprachverständlichkeit, aber er wird auch mehrfach von Spezialisten erwähnt, die die akustische Qualität bekannter Konzertsäle zu beurteilen hatten.

**A5-2.6.3 Räumlichkeitskriterien****A5-2.6.3.1 Seitliche Wirksamkeit LE und seitlicher Energieanteil LEF**

Diese Parameter haben ein Verhältnis zum räumlichen Eindruck. Sie benutzen das Verhältnis (seitliche Energie / Gesamtenergie).

Seitliche Wirksamkeit LE:

$$LE = \frac{E_{25}^{80}}{E_0^{80}}$$

Um diesen Faktor zu messen, wird ein 8-Kanal-Richtmikrofon verwendet (das Symbol ist  $\infty$ ) und ein Diffusfeldmikrofon.

Der seitliche Energieanteil ist das Verhältnis der früh ankommenden seitlichen Reflexionen, gemessen mit dem 8-Kanal-Richtmikrofon von 25 ms bis 80 ms, und der direkten Energie zusammen mit den frühen Reflexionen, die von allen Richtungen eintreffen, gemessen mit dem Diffusfeldmikrofon von 0 ms bis 80 ms.

Hohe Werte deuten an, dass wir von dem Schall „umhüllt“ sind.

**A5-2.6.3.2 Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient IACC**

Die Basis des IACC ist das Differenzmaß der Ankunftszeiten des Schalls an den beiden Ohren des Hörers, der dem Schallerzeuger in einer Halle zugewandt ist.

Der Gebrauch des IACC ist genauer, wenn er in Oktavbändern betrachtet wird. Der IACC (E) ist der interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient für den Zeitabschnitt von 8 ms bis 80 ms, wobei 0 ms der Moment ist, an dem der direkte Schallimpuls von der ungerichteten Quelle die winzigen Mikrofonw erreicht. Er ist der Durchschnitt der Messwerte in den drei Oktaven mit den Mittenfrequenzen 500, 1000 und 2000 Hz. Dieser Parameter hat eine ziemlich hohe Korrelation mit den subjektiven Bewertungen der akustischen Qualität, wie sie von qualifizierten Hörern, die im Auditorium saßen, vorgenommen wird. Eine besonders vorteilhafte Eigenschaft des IACC (E) ist, dass seine Messwerte in voll besetzten Sälen nur etwa 8 bis 10 % niedriger sind als in leeren Sälen.

**A5-2.6.2.2 Clarity  $C_{80}$** 

For music, it is considered that the ratio (useful field / diffuse field) is more interesting. The clarity factor is the ratio, expressed in decibels, of the energy in the first 80 ms of an impulse sound arriving at a listener's position divided by the energy in the sound after 80 ms. The divisor is approximately the total energy of the reverberant sound. The symbol indicates the average of the  $C_{80}$  values in the 500, 1000 and 2000 Hz octave bands.  $C_{80}$  is given by equation:

A high value of  $C_{80}$  means much early energy and high subjective clarity, while a low value indicates an unclear or muddy sound. In seats near the platform,  $C_{80}$  is normally higher than the value averaged over all positions. In areas with low ceiling height over the chairs (on and below balconies),  $C_{80}$  is generally higher because of a low level of late arriving sound reflections at such seats.

**A5-2.6.2.3 Initial time delay gap  $t_i$** 

It is the difference between the time at which the direct sound arrives at the listener's position and the time at which the first reflection from walls arrives. This factor is more correlated with speech intelligibility, but it was mentioned several times by specialists who judged the acoustical quality of well-known concert halls.

**A5-2.6.3 Spaciousness criteria****A5-2.6.3.1 Lateral Efficiency LE and Lateral Efficiency Fraction LEF**

These parameters are in relation with the spatial perception. They use the ratio (lateral energy / total energy).

Lateral Efficiency LE:

To measure this factor, we use a 8-figure directional microphone (the symbol is  $\infty$ ) and a random microphone.

The Lateral Energy Fraction is the ratio of the lateral early reflection measured with the 8-figure directional microphone from 25 ms to 80 ms, and the direct energy with the early reflections arriving from all directions, measured with the random microphone from 0 ms to 80 ms.

High values indicate that we are "enveloped" by the sound.

**A5-2.6.3.2 Interaural Cross-Correlation Coefficient IACC**

The basic of IACC is the measure of the difference in the sounds arriving at the two ears of a listener facing the performing entity in a hall.

The use of the IACC is more accurate when it is considered in octave bands. The IACC (E) is the interaural cross-correlation coefficient determined for a time period of 0 ms to 80 ms, where 0 ms is the time at which the direct impulse sound from the omni-directional source reaches the tiny microphones. It is the average of the values measured in the three octave bands at mid-frequencies of 500, 1000 and 2000 Hz. This parameter is fairly highly correlated with the subjective ratings of acoustical quality as expressed by qualified judges seated in the audience. A particularly favourable feature of IACC (E) is that its measured values are only 8 to 10% lower in fully occupied halls than its values measured in unoccupied halls.

**A5-2.6.4 Harmonie- und Gleichmäßigkeitskriterien****A5-2.6.4.1 Bassverhältnis BR**

BR wird durch die durchschnittliche Nachhallzeit bei 125 Hz und 250 Hz und die durchschnittliche Nachhallzeit bei 500 Hz und 1000 Hz Oktavbändern bestimmt. In Konzertsälen, die als erstklassig gelten, ist BR nahe 1,25.

**A5-2.6.4.2 Frühe Abklingzeit EDT**

EDT ist eine relativ neue Messung der Nachhallzeit T, die die subjektive Bedeutung des frühen Anteils des Nachhallprozesses in Rechnung stellt, indem sie die Steigung der Nachhallkurve während des ersten 10 dB Intervalls des Abklingens betrachtet.

Ein hoher EDT-Wert deutet viel Nachhall und damit geringe Klarheit an und umgekehrt. Die Unterschiede in der EDT sind von Platz zu Platz etwas größer als die in Nachhallzeit T. EDT-Werte in der Nähe der Bühne sind normalerweise niedriger als am Durchschnitt der Hörerplätze. Der Durchschnittswert im Hörerbereich ist normalerweise innerhalb  $\pm 0,2$  s von T.

EDT wird in derselben Weise wie T gemessen, mit der Ausnahme, dass dies die Zeit ist, die das Signal benötigt, um von 0 dB auf 10 dB im Verhältnis zu seinem stationären Wert zu gelangen.

**A5-2.6.4.3 Pegel (Stärke) L**

L ist als der Unterschied zwischen dem Schalldruckpegel an einem Sitzplatz definiert, wenn die Schallquelle auf der Bühne platziert ist, und dem Pegel in 10 m Abstand, wenn die Schallquelle unter Freifeldbedingungen aufgestellt ist. Auf diese Weise kann L benutzt werden, um die Schallverteilung in einem Saal zu messen.

$$L = 10 \log \left( \frac{E_0^\infty}{E_0(10 \text{ m})} \right)$$

L beschreibt den Einfluss des Saals auf den wahrgenommenen Pegel.

Bezüglich der Abweichungen innerhalb des Saals nimmt L gleichmäßig mit dem Abstand von der Quelle ab, so deutet dies ein nicht diffuses Schallfeld im Konzertsaal an.

Der vereinfachte Wert, der in einem diffusen Schallfeld erwartet werden kann, wird gegeben durch:

$$L_{\text{exp}} = 10 \cdot \log(T/V) + 45 \text{ dB}$$

wobei T in Sekunden und das Raumvolumen V in  $\text{m}^3$  angegeben wird.

**A5-2.6.5 Kriterien für die Bühne**

In einem Konzertsaal ist das akustische Wohlbefinden der Hörerschaft eine wichtige Überlegung, daneben ist es aber auch wichtig, den Musikern gute Bedingungen für die Darbietung zu geben.

Der Eindruck des Nachhalls für die Musiker korreliert mit der frühen Abklingzeit (EDT), die auf der Bühne gemessen wird, der so genannten  $\text{EDT}_{\text{pod}}$  oder mit dem Klarheitsmaß  $C_{80}$ , welches auf der Bühne in einem Meter Abstand von der Schallquelle gemessen wird,  $C_S$  genannt.

Die Möglichkeit der Musiker, einander zu hören, wird durch das Verhältnis  $\text{St}_{\text{early}}$  (oder ST1) beschrieben, dem Verhältnis der Energie der späten Reflexionen zu der Energie des Direktschalls und der frühen Reflexionen.

**A5-2.6.4 Harmony and homogeneity criteria****A5-2.6.4.1 Bass Ratio BR**

The BR is determined by the average reverberation time at 125 Hz and 250 Hz and the average reverberation time at 500 Hz and 1000 Hz octave bands. In concert halls considered to be excellent, the BR is near 1,25.

**A5-2.6.4.2 Early Decay time EDT**

EDT is a relatively new measure of reverberation time T, taking into account the subjective importance of the early part of the reverberation process by only looking at the slope of the T curve during the first 10 dB interval of the decay.

A high EDT value indicates much reverberance and low clarity and vice versa. The seat-to-seat variation of EDT is somewhat larger than the reverberation time T. EDT values near the platform are generally lower than the seat average. The averaged value in the audience area is generally within  $\pm 0,2$  s from T.

EDT is measured in the same way as T, except that it is the time it takes for a signal to decay from 0 dB to 10 dB relative to its steady-state value.

**A5-2.6.4.3 Level (strength) L**

L is defined as the difference between the sound pressure level at a seat position when the source is placed on the stage, and the level at 10 m distance when the source is placed under free field conditions. Thus, L can be used for measurement of the sound distribution in a hall.

L describes the influence of the hall on the perceived level.

Concerning the variation within the hall, L decreases monotonically with distance from the source, which is an indication of a non-diffuse sound field in the concert hall.

The simplified value, expected when the sound field is diffuse, is given by:

where T is given in seconds and the volume V in  $\text{m}^3$ .

**A5-2.6.5 Criteria for the stage**

In a concert hall, the acoustical comfort of the audience is a prime consideration, but to give musicians good conditions for music production, is also important.

The sense of reverberance for musicians is correlated with the EDT measured on the stage, called  $\text{EDT}_{\text{pod}}$ , or with the clarity factor  $C_{80}$  measured on the stage at one meter from the source, called  $C_S$ .

The possibility for musicians to hear each other is qualified by the ratio  $\text{St}_{\text{early}}$  (or ST1) of the energy of late reflections to the energy of the direct impact and the early reflections.

A5-3 Schlüsselparameter für verschiedene Räume		A5-3 Key parameters for different rooms				
A5-3.1 Allgemeines		A5-3.1 General				
Dieses Kapitel diskutiert die Raumarten gemäß Tabelle 10 und die Konsequenzen der Parameter gemäß Tabelle 3 für den jeweiligen Wert dieser Räume für ihre beabsichtigten Verwendungen. Diese Konsequenzen für die unterschiedlichen Raumtypen werden im Einzelnen in dem Kapitel diskutiert, das in der linken Spalte der Tabelle 10 angegeben ist.		This chapter discusses the types of rooms indicated in Table 10 and the consequences of the parameters shown in Table 3 for the respective values of these rooms for their intended purposes. These consequences for the different room types will be discussed in more detail in the chapter indicated in the left-hand column of Table 10.				
Kapitel Chapter	Raumtyp Type of room	Nachhallzeit Reverberation time	Sprachver- ständlichkeit Speech intelli- gibility	Schallpegelan- forderung Noise level requirement	Spezielle Be- handlung Special treat- ment	Schwierigkeit der Ermittlung Difficulty of study
A5-3.2	Büro Office	X		X		
A5-3.3	Klassenraum / Kindergarten Classroom / Kindergarten	X	X	X		
A5-3.4	Betrieb Workshop	X	(X)	X	X	
A5-3.5	Sitzungsraum Meeting room	X	(X)	X		
A5-3.6	Sporthalle Sport room	X	(X)	(X)	X	
A5-3.7.1	Großes Büro Large office		(X)	X	X	
A5-3.7.2	Restaurant		(X)		(X)	
A5-3.8	Großes Auditorium Large auditorium	X	X	X	X	XX
A5-3.9	Mehrzweckhalle Multi-purpose room	X	X	X	X	X
A5-3.10	Fernseh- / Aufnahmestudio TV / recording studio	X		X	XX	X
A5-3.11	Kino Cinema	X		X	X	X
A5-3.12.1	Hallraum Reverberant	X			XX	X
A5-3.12.2	Reflexionsarmer Raum Anechoic				XX	XX
A5-3.13	Reinraum (keimfrei) Clean room				X	

**Tabelle 10: Vorgeschlagene Schlüsselparameter für verschiedene Raumarten**

**Table 10: Key parameters suggested for different types of rooms**

### A5-3.2 Büros

In Büros differieren die akustischen Erwartungen je nach Bestimmung des Raumes und seiner vorherrschenden Nutzung. Gespräche in einem Konferenzraum stellen z. B. andere Anforderungen als telefonische Kommunikation in einem offenen Raum. Bürogebäude werden häufig entworfen und gebaut, bevor der endgültige Zweck und die akustischen Anforderungen genau bekannt sind. Der Bauunternehmer muss fundamentale akustische Eigenschaften sicherstellen und der Nutzer wird später bestimmte Eigenschaften ändern und einige Anpassungen an die vorgesehene Raumnutzung vornehmen müssen.

Ein Beispiel dieser nötigen Anpassung ist ein Bürogebäude mit vielen Großraumbüros. Entweder werden diese Großraumbüros als „offene Räume“ benutzt oder sie werden durch Trennwände in verschiedene Büros unterschiedlicher Größe unterteilt.

In offenen Räumen ist es sehr wichtig, dass das an einem Arbeitsplatz entstehende Geräusch, normalerweise Gespräche, die benachbarten Arbeitsplätze nicht beeinträchtigt. Hierfür gibt es zwei Lösungen:

- Verminderung des Schallpegels, der von einer Quelle kommt, durch absorbierende Materialien. Die Effekte solcher Maßnahmen sind im Kapitel A5-2.4.3 beschrieben.
- Erhöhung des Hintergrundgeräusches, um das Geräusch von einer Schallquelle zu verdecken. Nicht zu bevorzugen!

### A5-3.2 Offices

In offices, the acoustic expectations differ dependent on the designation of the room and its predominant use. For example, conversation in a meeting room does not cause similar requirements as telephone communication in an open space. Office buildings are frequently designed and built when their final purpose and the acoustical requirements are not yet known. The contractor must obtain a basic acoustic quality and the user will later need to change certain characteristics and do some adaptation work related to the intended use of the room.

An example of this necessary adaptation is an office building with many large hall offices. Either these large halls will be used as “open spaces”, or they will be separated with partition walls into several offices of different size.

In open spaces, it is very important that the noise produced on a workplace, generally conversations, does not trouble the neighbouring workplaces. For this, there are two solutions:

- Diminish the noise level coming from the source using absorbing materials. The effects of such measures are shown in chapter A5-2.4.3.
- Increase the background noise in order to mask the noise coming from the sound source. Not preferred!

- Errichtung von Schall begrenzendem Mobiliar oder absorbierenden Wänden zwischen den verschiedenen Abschnitten. Dies können Teilglaswände sein, um Blickverbindung sicherzustellen.

Diese beiden Lösungen haben begrenzten Effekt und nur ihre Kombination ist wirklich wirksam.

Die nachstehende Tabelle zeigt die Schallpegel in dB(A), die in verschiedenen Entfernungen von der Quelle erzielt werden, wenn die Decke und der Boden eines Großraumbüros hoch absorbierend sind ( $\alpha$  nahe 0,8) und wenn eine Konversation einen Schallpegel in der Nähe von 55 dB(A) in 1 m Abstand bewirkt. Diese Geräuschpegel sind den Pegeln im Freifeld sehr nahe.

Abstand Quelle – Empfänger (m) <i>Distance source – receiver (m)</i>	1	3	4	5	6,3
Freifeld <i>Free field</i>	55	45	43	41	39
Boden mit $\alpha = 0,5$ und Decke mit $\alpha = 0,8$ <i>Floor with <math>\alpha = 0,5</math> and ceiling with <math>\alpha = 0,8</math></i>	55	46	44	42	41

**Tabelle 11: Veränderung des Schalldruckpegels im Verhältnis zum Abstand zur Quelle in einem Großraumbüro**

Wenn das Hintergrundgeräusch 35 dB(A) ist, ein Wert, der für kleine Büros als akzeptabel gilt, ist der Pegelunterschied zwischen dem Konversationsgeräusch und dem Hintergrundgeräusch ausreichend, um die Konversation noch in einem Abstand von 6 m von der Quelle zu verstehen. Wenn das Hintergrundgeräusch jedoch auf 45 dB(A) ansteigt, ist es schwierig, die Konversation im Abstand von 4 m oder mehr zu verstehen.

Ein Großraumbüro benötigt also ein relativ hohes Hintergrundgeräusch, um Gespräche zwischen verschiedenen Personen oder telefonische Kommunikation an benachbarten Arbeitsplätzen zu verdecken. Es wird auch nötig, die Decke und den Fußboden mit hoch absorbierenden Materialien zu bedecken, um den bestmöglichen Pegelabfall im Verhältnis zum Abstand von der Quelle zu erreichen (siehe Kapitel A5-3.7).

Andererseits ist ein hoher Hintergrundgeräuschpegel nicht akzeptabel in geschlossenen Einzelbüros und ein „totes“ Umfeld (reflexionsarm) gilt nicht als angenehm.

Wenn ein Großraumbüro in kleine Arbeitszellen unterteilt wird, sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um den Hintergrundgeräuschpegel deutlich abzusenken. Da der Hintergrundgeräuschpegel häufig von den Schallabstrahlungen der Lüftungs- und Klimaanlage-Systeme abhängt, sollte die erste Bewertung der benötigten Veränderungen gewisse Anpassungen in diesen vorsehen. Wir können drei Haupttypen von Büros unterscheiden:

- Einzelbüro für eine Person,
- Gemeinschaftsbüros (mittelgroß für zwei bis fünf Personen),
- offene Räume (Großraumbüros).

Im folgenden Kapitel werden die ersten beiden Bürotypen untersucht. Großraumbüros werden im Kapitel A5-3.7 behandelt, Sitzungsräume im Kapitel A5-3.5.

#### **A5-3.2.1 Geschlossene Einzel- oder Gemeinschaftsbüros - Allgemeines**

Die akustischen Kriterien für ein geschlossenes Büro bilden eine Reihe von Bedingungen, bei der jedes Element mit den anderen eng verbunden ist. Insbesondere ist es wichtig, den Gesamtschallpegel im Raum zu beherrschen. Dieser Gesamtschallpegel ist eine Kombination des Geräusches von außen, von Anlagen im Gebäude und von angrenzenden Räumen.

- Installation of sound barrier furniture or absorbent walls between the different sectors. It could be partly glass walls to assure the visual contact.

These two solutions have limited effects, and only a combination of the two is really effective.

The following table shows the noise levels in dB(A) obtained at several distances from the source when the ceiling and the floor of an large office hall are very absorbing ( $\alpha$  near 0,8) and when a conversation produces a noise level near 55 dB(A) at 1 m distance. These noise levels are very near the levels obtained in a free field.

**Table 11: Variation of the sound pressure level in relation with distance to the source in a large office hall**

If the background noise is 35 dB(A), often well accepted in little offices, the level difference between the conversation noise and the background noise will be sufficient to make the conversation understood even at 6 m from the source. If the background noise is increased to 45 dB(A), it will be difficult to understand the conversation at 4 m or more.

So, a large office hall needs a relatively high background noise level to mask conversations between several persons or telephone communication at neighbouring workstations. It is also necessary to cover the ceiling and the floor with high absorbing materials in order to obtain the best possible sound level decrease in relation to the distance from the source (see chapter A5-3.7).

On the other hand, a high background noise level is unacceptable in closed individual offices and a “deaf” environment (anechoic) is not considered comfortable.

If a large hall office is partitioned into small working cubicles, additional measures are needed to reduce the background noise level substantially. Since the background noise level is frequently due to sound emissions from ventilating and air-conditioning systems, the initial assessment of the required modifications should foresee certain adjustments in those. We can discern three principal types of offices:

- individual office for one person,
- collective offices (medium-size for two to five persons),
- open spaces (large hall offices).

In the chapter below, we will examine the first two offices types. Large hall offices will be treated in chapter A5-3.7, meeting rooms will be dealt with in chapter A5.3.5.

#### **A5-3.2.1 Closed individual or collective offices – General**

The acoustic criteria for a closed office form a set of conditions where each element is closely linked to the others. In particular, it is essential to control the overall noise level in the room. This overall noise level is a combination of the noises from outside, from the room equipment and from adjacent rooms.

- Das von außen kommende Geräusch hängt von Autos, Zügen oder Luftverkehr oder vom Lärm, der durch andere Aktivitäten in der Nachbarschaft entsteht, ab und wird von der akustischen Qualität der Gebäudefassade bestimmt. Diese akustische Dämmung wird durch die Standardpegeldifferenz  $D_{nTA,Tr}$  (oder  $D_{nTW} + C_{Tr}$ ) der Fassade charakterisiert. Die zur Verfügung stehenden Methoden für eine akustische Schalldämmung gegen den Außenlärm sind im Dokument A4-2 beschrieben.
- Das von außen kommende Geräusch könnte durch den dB(A)-Pegel charakterisiert werden, der in mehr als 50 % der Zeit vorherrscht,  $L_{50}$ , im Raum gemessen zwischen 9.00 und 18.00 Uhr, während die Anlagen im Gebäude nicht in Betrieb sind. Allerdings kann man nicht sicherstellen, dass der beim Entwurf des Gebäudes beabsichtigte Grenzwert des dB-Pegels nicht überschritten wird, wenn die Büros benutzt werden. Außengeräusche variieren häufig sehr stark. Ein Basiswert muss deswegen bestimmt werden, ermittelt aus Simulationen oder Messungen auf dem Baugrundstück vor Beginn der Bautätigkeit. Dieser Basiswert wird später benutzt, um die erforderliche Schalldämmung zu bestimmen, und diese erforderliche Schalldämmung kann der Bauausführende dann sicherstellen (die Schalldämmung hängt nicht von dem tatsächlich vorherrschenden Schallpegel ab).
- Lärm wird auch die die arbeitenden Anlagen im Gebäude erzeugt: Einzelne Elemente sind mehr als 50 % der Zeit, in denen das Büro benutzt wird, in Betrieb. Die Anlagengeräusche sind heranzuziehen, wenn die Geräte mit einer bestimmten Nenndrehzahl arbeiten. Wenn z. B. ein Lüftungssystem drei mögliche unterschiedliche Geschwindigkeiten hat und der Benutzer des Büros zwischen ihnen wählen kann, wird der Geräuschpegel der mittleren Geschwindigkeit herangezogen.
- Anlagengeräusche können in dB(A) gemessen werden, vorzugsweise in Oktavbändern, um die NR-Pegel (in mehreren Ländern im Gebrauch) oder die NBC-Pegel (siehe A4-2.4.2) zu benutzen.
- Geräusche von Anlagen, die nur gelegentlich im Betrieb sind, wie sanitäre Rohrleitungen, könnten durch ihren höchsten Geräuschpegel  $L_{max}$  charakterisiert werden.
- Geräusche aus angrenzenden Räumen: Dieser Schallpegel hängt von den Pegeln ab, die im Nachbarraum erzeugt werden und von der Schalldämmung zwischen diesem Raum und dem benachbarten Büro. Das Kriterium für die Schalldämmung kann entweder die genormte oder standardisierte Pegeldifferenz oder das bewertete Schalldämmmaß  $R'_w$  sein. Um den geeigneten Wert der Pegeldifferenz zu bestimmen, ist es nötig, eine qualitative Zielvorstellung zu entwickeln. Zum Beispiel, ob normale Konversation im angrenzenden Raum mit dem normalen Sprechschallpegel nicht verstanden werden soll (wir können hören, dass jemand spricht, aber wir können ohne besondere Lauschanstrengung nicht verstehen, was gesagt wird) oder ob das Ziel Vertraulichkeit sein sollte (die Sprache ist nicht verständlich, selbst wenn angestrengt gelauscht wird). Die Schallpegeldifferenz, die man erreichen muss, hängt von dieser qualitativen Zielvorstellung ab und vom Gesamtschallpegel in dem Raum, in dem wir uns befinden. Die Mittel, die benötigt werden, um eine angestrebte Pegeldifferenz zu erreichen, werden im Kapitel A5-1 beschrieben.
- The noise coming from outside depends on cars, trains or air traffic or noise caused by other activities in the neighbourhood and is dependent upon the acoustic quality of the building facade. This acoustic insulation is characterised by the standardised level difference  $D_{nTA,Tr}$  (or  $D_{nTW} + C_{Tr}$ ) given by the façade. The methods of choice to obtain an acoustical sound insulation against external noise are described in document A4-2.
- The noise coming from outside could be characterised by the dB(A) level prevailing more than 50% of the time  $L_{50}$ , measured in the room between 9.00 and 18.00 h, whilst the building equipment does not work. However, one cannot guarantee that the limit value of this dB level, intended in the design of the building, will not be exceeded when the offices are in use. External noises are frequently very fluctuating. A basic value must therefore be determined, which is derived from simulations or from measurements on the site prior to the commencement of the construction work. This basic value is used later to determine the sound insulation that must be obtained, and this is the sound insulation the builder is able to guarantee (sound insulation does not depend on the actually existing noise level).
- Noise caused by the working building equipment: Some elements are in operation more than 50% of the time the office is in use. Equipment noises must be taken into consideration when the appliances are working in an established nominal speed. For example, if a ventilation system has three possible different speeds and the office occupant has the choice between those, the noise level caused by the middle speed is considered.
- Equipment noise can be measured in dB(A), or preferably in octave bands, in order to use NR levels (used in several countries) or in NBC levels (see A4-2.4.2).
- Noise due to equipment, which only work occasionally, such as sanitary plumbing, could be characterised by their maximum noise level  $L_{max}$ .
- Noise from adjacent rooms: This noise level depends on the noise level emitted in the neighbouring room and on the sound insulation between that room and the office considered. The sound insulation criteria can either be the normalised or standardised level difference or the apparent weighted sound reduction index  $R'_w$ . In order to determine the suitable value of level difference, it is necessary to fix a qualitative target. For example, normal conversation in a neighbouring room, at the sound level of normal talk, should not be intelligible (we can hear that somebody talks, but we cannot understand what he says without a special eaves dropping effort), or the aim would be confidentiality (the speech is incomprehensible even if we make a special eaves dropping effort). The sound level difference to obtain is a consequence of this qualitative target and of the overall sound level in the room in which we stay. The means needed to obtain a level difference target are described in chapter A5-1.

Bezüglich der internen akustischen Eigenschaften gilt, dass sie sowohl Telefongespräche als auch Konversation zwischen zwei oder drei Personen ermöglichen müssen. Eine Konsequenz dieses Ziels ist die Notwendigkeit einer Nachhallzeit unter einem bestimmten Grenzwert, welcher häufig mit 0,6 s oder 0,7 s festgelegt wird.

#### A5-3.2.2 Anforderungen und Empfehlungen

In europäischen Ländern gibt es nicht viele Vorschriften für die akustische Qualität von Büros. Wo es sie gibt, betreffen sie hauptsächlich den Gesamtschallpegel und die Schallpegeldifferenz zwischen Büros, die einzuhalten sind.

As for internal acoustic characteristics, they have to allow for telephone conversation as well as for conversations between two or three persons. A consequence of this target is the need of a reverberation time under a limit, which is often fixed at 0,6 s or 0,7 s.

#### A5-3.2.2 Requirements and recommendations

In European countries, not many regulations exist for the acoustic quality of offices. Where they exist, they are principally concerned with overall sound levels and the sound level difference between offices, which need to be obtained.

Zurzeit bereitet in Frankreich eine Arbeitsgruppe der französischen Normungsorganisation (AFNOR) eine Norm vor, die Empfehlungen für Planer und Nutzer von Bürogebäuden enthält. Diese ist ein Bezugsdokument bezüglich des akustischen Umfeldes in tertiären Räumen (Büros) und sie enthält qualitative Zielvorstellungen für das Arbeitsumfeld. Das Ziel dieses Dokuments ist es, die Aufgaben der verschiedenen Berufe zu erleichtern, die bei der Konstruktion oder der Renovierung von Bürogebäuden beteiligt sind.

Currently, in France, a working group of the French standardisation association (AFNOR) prepare a standard containing recommendations for designers and users of office buildings. It is a reference guide concerning the acoustic environment in tertiary spaces (offices) and contains quality targets for the working environment. The purpose of this document is to facilitate the tasks of the different professions involved in the construction or renovation of office buildings.

Für jeden Raumtyp wird dieses Dokument das akustische Umfeld definieren und in drei Ebenen klassifizieren:

For each type of room, this document will define and classify the acoustic environment in three levels:

- Basisebene A: minimale Leistungen erforderlich,
- gehobene Ebene B,
- höchste Ebene C: das Ziel ist nur, die Geräusche, welche mit der Arbeit verbunden sind, wahrzunehmen und Geräusche nicht wahrzunehmen, die mit der eigenen Arbeit nichts zu tun haben.

- Basic level A: minimum performances required,
- outstanding level B,
- high performance level C: the aim is to perceive the sound needed for the work and not to perceive the sounds not associated with the work at hand.

In allen Fällen bezieht sich die vorgesehene Leistung auf voll möblierte, aber nicht besetzte Räume, mit Gebäudeanlagen im Betrieb, aber ohne irgendwelche Geräusche von Büroeinrichtungen.

In all cases, the performance envisaged corresponds to fully furnished, but not occupied rooms, with building equipment in operation, but without any office equipment noise.

Als Beispiel gibt Tabelle 12 Schallpegel und Nachhallzeiten für Einzel- und Gemeinschaftsbüros an.

As an example, Table 12 gives sound levels and reverberation time performances for individual and collective offices.

Bürotyp <i>Type of office</i>	Kriterium <i>Criterion</i>	Qualitätsebene A <i>Quality level A</i>	Qualitätsebene B <i>Quality level B</i>	Qualitätsebene C <i>Quality level C</i>
Einzelbüro <i>Individual office</i>	Gesamtschallpegel <i>overall sound level</i>		35 < L <sub>50</sub> < 40 dB(A)	30 < L <sub>50</sub> < 35 dB(A)
	Nachhallzeit <i>reverberation time</i>		T <sub>r</sub> < 0,7 s	T <sub>r</sub> < 0,5 s
Gemeinschaftsbüro <i>Collective office</i>	Gesamtschallpegel <i>overall sound level</i>		35 < L <sub>50</sub> < 40 dB(A)	30 < L <sub>50</sub> < 35 dB(A)
	Nachhallzeit <i>reverberation time</i>	T <sub>r</sub> < 0,6 s	T <sub>r</sub> < 0,6 s	T <sub>r</sub> < 0,5 s

**Tabelle 12: Empfehlungen für Einzel- oder Gemeinschaftsbüros**

**Table 12: Recommendations for individual or collective offices**

T<sub>r</sub> ist der Durchschnittswert der Nachhallzeit in den Oktavbändern 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz.

T<sub>r</sub> is the average value of reverberation time in the 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz octave bands.

### A5-3.2.3 Berechnung

### A5-3.2.3 Calculation

#### A5-3.2.3.1 Nachhallzeit

#### A5-3.2.3.1 Reverberation time

Trotz der Unzulänglichkeiten oder der Bedingungen für ihre Benutzung ist die Sabine-Formel ausreichend, um die Nachhallzeit eines Raumes zu erhalten. Sie gibt Ergebnisse, die sich innerhalb von ± 10 % der aktuellen (gemessenen) Werte bewegen. Diese Unsicherheit bedeutet keinen Schallpegelunterschied, der auf die hörbare akustische Qualität irgendeinen Einfluss hätte.

In spite of its imperfections or more or less the conditions for its utilisation, the Sabine formula is sufficient to obtain the reverberation time of the room. It renders results which will be inside ± 10% of the actual (measured) values. This uncertainty does not mean a sound level difference which will have any effect on the audible acoustic quality.

Sabine-Formel:  $T = 0,16 V / A$ , wobei V das Raumbvolumen in m<sup>3</sup> und A die äquivalente Absorptionsfläche in dem Raum ist.

Sabine formula:  $T = 0,16 V / A$ , where V is the room volume in m<sup>3</sup> and A the equivalent absorption area of the room.

Als eine handhabbare Annäherung ist die Benutzung des Abakus im Kapitel A5-3.3.2 ausreichend, wenn der Raum parallelepiped (kastenförmig) ist.

As a workable approximation, the use of the abacus in chapter A5-3.3.2 is sufficient if the room is parallelepipedic (box-shaped).

1. Beispiel: Ein Einzelbüro mit 5 m Länge, 3 m Breite und 2,7 m Deckenhöhe entspricht einem Raumbvolumen von 40,5 m<sup>3</sup>. Es ist geplant, den Boden mit Teppich auszulegen und die Decke mit einem absorbierenden Material aus gepressten Fasern mit einer rauen Oberfläche auszustatten. Die anderen Wände sind die Fassade mit Fenstern und leichte Trennwände.

1<sup>st</sup> example: An individual office with 5 m length, 3 m width and 2,7 m height under the ceiling, meaning a volume of 40,5 m<sup>3</sup>. It is foreseen to cover the floor with a carpet and to equip the ceiling with an absorbing material of compressed fibres and a torn surface. The other walls are the façade with windows and light partition walls.

Zur Vorhersage der Raumqualität mit Hilfe der Sabine-Formel (siehe Tabelle 13).

Predicting the room performance with the help of the Sabine formula (see Table 13).

		125	250	500	1000	2000	4000
Decke <i>Ceiling</i> 15 m <sup>2</sup>	$\alpha$	0,48	0,57	0,62	0,79	0,99	0,99
	$A = S \cdot \alpha$	7,2	8,6	9,3	11,9	14,9	14,9
Boden <i>Floor</i> 15 m <sup>2</sup>	$\alpha$	0,12	0,20	0,25	0,45	0,50	0,55
	$A = S \cdot \alpha$	1,8	3	3,9	6,8	7,5	8,2
Zwischenwände <i>Partitions</i> 35 m <sup>2</sup>	$\alpha$	0,15	0,13	0,10	0,09	0,08	0,07
	$A = S \cdot \alpha$	5,2	4,6	3,5	3,1	2,8	2,5
Fassade <i>Façade</i> 8 m <sup>2</sup>	$\alpha$	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
	$A = S \cdot \alpha$	1,4	0,5	0,3	0,2	0,15	0,15
Gesamt <i>Total</i>	$A$ (m <sup>2</sup> )	15,6	16,7	17	22	25,4	25,8
$T_r = 0,16 V/A$ (s)		0,41	0,39	0,38	0,29	0,26	0,25
Durchschnitts- $T_r$ (s) <i>mean <math>T_r</math></i> (s)				0,31			

**Tabelle 13: Berechnung für das 1. Beispiel, mit absorbierendem Material an der Decke**

**Table 13: Calculation of 1<sup>st</sup> example, with absorbent material on the ceiling**

Der berechnete Wert ist deutlich kleiner als der anspruchsvollere Zielwert der Tabelle 1 im Kapitel A5-3.2.2.

The calculated value is clearly smaller than the more demanding target value of Table 1 in chapter A5-3.2.2.

Wenn das gut absorbierende Deckenmaterial durch ein Produkt geringerer Absorptionsleistung ersetzt wird, wie einem Material aus gepressten Fasern mit glatter Oberfläche, wird das Ziel der Qualitätsebene B erreicht, wie in Tabelle 14 gezeigt.

If we replace the well absorbing ceiling material by a product of lesser performance, such as a material with compressed fibres and a smooth surface, then the target for the quality level B is reached, as is shown in Table 14.

		125	250	500	1000	2000	4000
Decke <i>Ceiling</i> 15 m <sup>2</sup>	$\alpha$	0,23	0,17	0,12	0,16	0,16	0,15
	$A = S \cdot \alpha$	3,5	2,6	1,8	2,4	2,4	2,3
Boden <i>Floor</i>	$A = S \cdot \alpha$	1,8	3	3,9	6,8	7,5	8,2
Zwischenwände <i>Partitions</i>	$A = S \cdot \alpha$	5,2	4,6	3,5	3,1	2,8	2,5
Fassade <i>Façade</i>	$A = S \cdot \alpha$	1,4	0,5	0,3	0,2	0,15	0,15
Gesamt <i>Total</i>	$A$ (m <sup>2</sup> )	11,7	10,7	9,6	12,5	12,9	13,2
$T_r = 0,16 V/A$ (s)		0,55	0,61	0,68	0,52	0,50	0,49
Durchschnitts- $T_r$ (s) <i>mean <math>T_r</math></i> (s)				0,57			

**Tabelle 14: Berechnung für das 1. Beispiel, mit geringer Absorption an der Decke**

**Table 14: Calculation of 1<sup>st</sup> example, with a lower absorption on the ceiling**

In diesem letzten Fall liegt der durchschnittliche Absorptionskoeffizient in den Oktaven 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz bei 0,13, derjenige des Bodens ist 0,4. Dies entspricht einem akkumulierten Absorptionskoeffizienten von 0,53 für ein äquivalentes Material, das eine Fläche entsprechend der Deckengröße bedeckt. Für diesen Fall gibt der Abakus im Kapitel A5-3.3.2 eine Nachhallzeit von 0,58 s an, was praktisch dem Ergebnis der oben stehenden Berechnung entspricht.

In this last case, the average absorption coefficient in the octaves 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz is 0,13, the one of the floor is 0,4. This corresponds to an accumulated absorption coefficient for an equivalent material covering an area the size of the ceiling of 0,53. In this case, the abacus of chapter A5-3.3.2 gives a reverberation time of 0,58 s, practically equal to the result of the calculation above.

Anmerkung: Wenn das betrachtete Büro dadurch entstanden ist, dass ein Großraumbüro mit dem Verhalten eines offenen Raumes durch Trennwände unterteilt worden ist, ist es wahrscheinlich, dass die oben beschriebene Decke mit dem besseren Absorptionsverhalten benutzt wird.

Note: If the office examined has been constructed by partitioning a large office hall with the performance of an open space, it is likely that the better absorbing ceiling described above will be used.

2. Beispiel: Gemeinschaftsbüro mit 5 m Länge, 10 m Breite und 2,7 m Deckenhöhe. Für dieses Büro wird ein höher absorbierendes Deckenmaterial betrachtet. Das Raumvolumen beträgt 135 m<sup>3</sup>.

2<sup>nd</sup> example: Collective office with 5 m length, 10 m width and 2,7 m height under the ceiling. For this office, we will consider a higher performing absorbing material for the ceiling. The room volume is 135 m<sup>3</sup>.

Mit derselben Verkleidung der Wände ist die durchschnittliche Nachhallzeit in dem Gemeinschaftsbüro (135 m<sup>3</sup>) sehr nahe derjenigen, die für das Einzelbüro (40 m<sup>3</sup>) erzielt wurde.

With the same coverings on the walls, the average reverberation time in the collective office (135 m<sup>3</sup>) is very close to the one obtained in the individual office (40 m<sup>3</sup>).

**A5-3.2.3.2 Sprachverständlichkeit**

In den beiden oben stehenden Beispielen ist der RASTI-Index häufig über 80 %; ein Wert, der als Hinweis für ausgezeichnete Verständlichkeit steht. Zur Berechnung dieses Sprachverständlichkeitsindex ist es ratsam, eine andere Software zu benutzen.

In beiden Fällen, demjenigen des Einzelbüros und demjenigen des Gemeinschaftsbüros, in denen die Grenzen des Gesamtschallpegels nicht überschritten werden und in denen die Nachhallzeit entsprechend der Zielvorstellung relativ kurz ist, gibt es kein Problem mit der Sprachverständlichkeit, wenn zwei oder drei Personen sprechen.

Aber in einem Gemeinschaftsbüro, in dem mehr als fünf Arbeitsplätze sein können, kann die ausgezeichnete Verständlichkeit an allen Plätzen des Raumes auch ein Nachteil sein: Eine Unterhaltung an einem Arbeitsplatz darf die Konzentration der anderen Personen, die sich im Raum aufhalten (und möglicherweise arbeiten), nicht beeinträchtigen. Eine oberflächliche Lösung könnte ein leichtes Anheben (sagen wir mal 5 dB(A) z. B. des Gesamtschallpegels im Vergleich zum vorher definierten Ziel) sein und ein Bemühen, die eigene Stimme nicht zu erheben.

Andererseits wird es Momente geben, in denen alle Personen im Raum gleichzeitig reden. Zum Beispiel bei Telefonvermittlungen, wenn alle Telefonisten gleichzeitig mit ihren Kunden reden. In den meisten Fällen benutzen die Mitarbeiter Kopfhörer, die die Geräusche von den anderen Arbeitsplätzen mindern und die ihnen erlauben, sich darauf zu konzentrieren, was ihr individueller Kunde sagt. Womöglich kann der Kunde aber das Schallumfeld des Raumes wahrnehmen. Dieser Nachhall kann durch die Benutzung von Richtmikrofonen vermieden werden und durch eine zusätzliche akustische Behandlung des Raumes mit Schallschirmen, die normalerweise in das Mobiliar des einzelnen Arbeitsplatzes integriert werden.

**A5-3.3 Klassenräume / Kindergärten****A5-3.3.1 Allgemeines**

Gutes Verständnis, nicht bloß im Sinne des Begreifens, sondern auch in der Bedeutung der Hörbarkeit einer Nachricht, ist in Klassenräumen von größter Wichtigkeit. Die Nachricht muss richtig am Ohr der Person ankommen, die sie verstehen soll. Die akustischen Eigenschaften des Raumes sind die hauptsächlichsten Faktoren für eine gute Qualität des Empfangs. Es ist schwer, in einem halligen Raum ohne absorbierende Materialien an Wänden und Decke gut verstanden zu werden: Der Schall bleibt lange im Raum, da er nicht absorbiert, sondern stattdessen ständig von Wänden und Decke reflektiert wird. Die nachhallende „Wiederholung“ überlappt das „ursprüngliche Signal“. Das Ergebnis ist eine unverständliche Mixtur.

Aber es ist auch schwer, in einem reflexionsarmen Raum zu kommunizieren, wo die absorbierenden Materialien an Wänden und Decke auftreffende Schallwellen völlig absorbieren, wodurch eine Unterstützung der direkten Übertragung vom Sprecher zum Hörer durch den reflektierten Schall verhindert wird. Um ein gutes Hören an fernen Plätzen zu erreichen, müsste der Sprecher sein Stimmvolumen erhöhen und er würde rasch ermüden.

Für ein gutes akustisches Umfeld muss eine passende Balance zwischen absorbierenden und reflektierenden Oberflächen im Raum gefunden werden. Für verschiedene Zwecke sind sehr unterschiedliche Balancen dieser beiden Qualitäten erforderlich und es muss eine korrekte Auswahl für ihren Anwendungsbereich getroffen werden.

Ein anderer Aspekt für die akustische Qualität eines Raumes ist das vorherrschende Hintergrundgeräusch. Dies ist der wahrgenommene Geräuschpegel, wenn niemand redet. Das Hintergrundgeräusch kann Teile der Kommunikation verdecken.

Hauptquellen für Hintergrundgeräusche sind:

**A5-3.2.3.2 Intelligibility of speech**

In both examples given above, the RASTI index is frequently over 80%; a value considered as an indication of an excellent intelligibility. For the calculation of these intelligibility indices, it is advisable to use different software.

In both cases, the individual office and the collective office, in which the limits of the overall sound levels are not exceeded and in which the reverberation time is relatively low, according to the aim, there is no problem of intelligibility of speech when two or three persons are talking.

But in a collective office, in which we can have more than five working places, the excellent intelligibility in all places of the room can be of disadvantage: A conversation at one workstation must not perturb the concentration of the other persons staying (perhaps working) in the room. A superficial solution would be the light increase (say e. g. 5 dB(A) of the overall sound level in comparison with the target previously given) and an attention given to not raising the voice.

On the other hand, situations will occur when all the persons in a room talk at the same time. For example in telephone exchanges, all operators talk with their clients simultaneously. In most cases, operators use headphones which attenuate noises coming from other workstations and which allow for their concentration on what their individual client says. But on the other hand, the client can perhaps hear the room's sound environment. This inconvenience can be avoided by using directional microphones and by a complementary acoustical room treatment with screens, generally integrated into the furniture of the workstations.

**A5-3.3 Classrooms / Kindergarten****A5-3.3.1 General**

Proper understanding, not just in the sense of comprehension, but also in the meaning of audibility of the message, is of prime importance in classrooms. The message must correctly arrive at the ear of the person supposed to understand it. The acoustic parameters of the room are the main factors for a good reception quality. It is difficult to be well understood in a reverberant room without absorbing materials on walls and ceiling: Sounds stay a long time in the enclosure, because they are not absorbed, but instead reflected by the walls and the ceiling. The reverberant "repetition" overlaps the "original signal". The result is an incomprehensible mixture.

But it is also difficult to communicate in an anechoic room where absorbing materials on walls and ceiling totally absorb impacting noise waves, preventing any increase of the direct transmission from the speaker to the listener by reflected sounds. For having a good hearing in distant places, the speaker would need to increase his voice volume and soon be tired.

For a good acoustic environment, the proper balance must be found between absorbing and reflecting surfaces in the room. For different purposes, very different balances of these two qualities must be struck and a proper choice for their area of application must be made.

Another aspect of the acoustic quality of a room is the pertinent background noise. This is the noise level noted when nobody speaks. Background noise can mask part of the aural communication.

Main sources of background noise are:

<ul style="list-style-type: none"> <li>- außen entstehende Geräusche, wie Verkehr oder Maschinen außerhalb des betrachteten Raumes,</li> <li>- Geräusche, entstehend in angrenzenden Räumen, Korridoren oder durch technische Anlagen,</li> <li>- Geräusche, die durch Geräte im Raum selbst entstehen, Ventilationsgeräusche, durch summende elektrische Anlagen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- externally generated noise, such as traffic or machinery outside the room in question,</li> <li>- noise generated in adjacent rooms, corridors or technical installations,</li> <li>- noise generated by equipment in the room itself, ventilation noise, humming electrical installations.</li> </ul>
<p>Die ersten beiden Geräuscherzeuger erzeugen fluktuierende Geräusche mit zeitlich stark variierendem Schallpegel. Der dritte Geräuscherzeuger erzeugt fluktuierende Geräusche (Rohrleitungen) oder konstante Geräusche (Lüftung).</p>	<p>The first two noise generators create fluctuating noises with great variations of the sound level over time. The third noise generator creates fluctuating noises (plumbing) or constant noises (ventilation).</p>
<p>Das Hintergrundgeräusch verdeckt den Schall, der für die Verständigung zwischen Sprecher und Hörer benötigt wird. Der erforderliche Aufwand, um eine Nachricht zu bekommen, wächst mit steigenden Hintergrundgeräuschpegeln.</p>	<p>The background noise masks the sound needed for communication between speaker and listener. The effort needed to get the message across increases with increasing background noise levels.</p>
<p>Für die Abschätzung der inneren akustischen Bedingungen eines Raumes benutzen die meisten nationalen Regelwerke eine Begrenzung der Nachhallzeit. Für Klassenräume wird normalerweise ein Bereich akzeptabler Nachhallzeiten angegeben (z. B. zwischen 0,4 s und 0,8 s), da besonders kurze Nachhallzeiten – nahezu bedämpfte Räume – auch wieder schlechte Kommunikationsbedingungen für Klassenräume schaffen.</p>	<p>For the assessment of internal room acoustic conditions, most national regulations consider a limitation to reverberation time. For classrooms, normally a range for acceptable reverberation times (e. g. between 0,4 s and 0,8 s) should be given, because too short reverberation times – nearly deaf rooms – also give bad classroom communication conditions.</p>
<p><b>A5-3.3.2 Anforderungen und Empfehlungen</b></p>	<p><b>A5-3.3.2 Requirements and recommendations</b></p>
<p>In vielen Ländern gibt es nationale Anforderungen. Nachstehend werden einige Beispiele für die Anforderungen in französischen Regelwerken für Schulen angegeben.</p>	<p>In several countries, there are national requirements. Below, some examples of requirements in the French regulation for schools are given.</p>
<p>Im Bereich der Raumakustik gibt es drei Arten von Anforderungen:</p>	<p>In the field of room acoustics, there are three kinds of requirements:</p>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Benötigte Nachhallzeit: zum Beispiel das arithmetische Mittel von Nachhallzeiten in den Oktavbändern mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz muss in einem nicht besetzten, aber normal ausgerüsteten Unterrichtsraum zwischen 0,4 s und 0,8 s betragen, wenn das Raumvolumen unter 250 m<sup>3</sup> liegt.</li> <li>2. Akustische Untersuchungen sind durch spezialisierte Büros auszuführen: zum Beispiel muss ein Mehrzweckraum mit einem Volumen über 250 m<sup>3</sup> eine mittlere Nachhallzeit zwischen 0,6 s und 1,2 s aufweisen und die akustische Behandlung, die benötigt wird, um gute Verständlichkeit an jedem Punkt des Raumes sicherzustellen, ist besonders zu belegen.</li> <li>3. Äquivalente Absorptionsfläche, die in einem Raum benötigt wird: die äquivalente Absorptionsfläche von absorbierenden Materialien in einem Korridor, einer Halle unter 250 m<sup>3</sup> Volumen oder einem überdachten Vorhof muss mindestens die Hälfte der Bodenfläche des betrachteten Raumes betragen.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reverberation time required: for example, the arithmetical mean of reverberation times in octave bands centred on 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz must be between 0,4 s and 0,8 s in a teaching room not occupied, but with normal set, when the volume of this room is under 250 m<sup>3</sup>.</li> <li>2. Acoustic study to be performed by a specialised office: for example, a multi-purpose room with a volume over 250 m<sup>3</sup> must have a mean reverberation time between 0,6 s and 1,2 s and a special study must establish the acoustic treatment needed to give a good intelligibility at every point of the room.</li> <li>3. Equivalent absorption area needed in a room: the equivalent absorption area of absorbing materials introduced in a corridor, a hall under 250 m<sup>3</sup> volume or a covered courtyard must be at least equal to the half of the floor surface of the space considered.</li> </ol>

**A5-3.3.3 Berechnung****A5-3.3.3.1 Nachhallzeit**

Die Berechnung der Oberfläche von absorbierendem Material, das in einem Raum benötigt wird, erfordert keine komplizierten Überlegungen. Die benötigte Fläche hängt von den Dimensionen des Raumes ab, in dem die Nachhallzeit beherrscht werden muss. Die erste Messung sollte in einem nicht besetzten, jedoch voll möblierten Raum geschehen. Wenn der Raum leer ist und wenn er normale Parallelepipede (kastenförmige) Form aufweist und nur die Decke mit schallabsorbierendem Material verkleidet ist, ist es unmöglich, die tatsächliche Nachhallzeit zu messen, da die Schallenergie durch Wände und Zwischenwände reflektiert wird, bevor sie die absorbierende Fläche der Decke erreicht. Wenn der Raum möbliert ist, erzeugen Tische und Stühle Beugungseffekte und korrekte Messwerte können erhalten werden. Jedoch ist es in diesem Fall schwierig, die Schallabsorption an den Möbeloberflächen einzubeziehen. Die Anzahl der Schüler, die in dem Klassenraum sein dürfen, hängt von der Fläche des Raumes ab, wie auch die Menge der Möbel. Die Auswertung einer großen Anzahl von Messungen, die in möblierten Klassenräumen mit parallelepipedischen Dimensionen, jedoch ohne absorbierende Materialien an den Wänden oder der Decke gemacht worden ist, zeigt, dass die mittlere äquivalente Schallabsorptionsfläche in einem Klassenraum ungefähr  $0,25 \cdot S$  ist, wobei  $S$  die Bodenfläche darstellt. Es besteht demnach eine Relation zwischen dem Absorptionskoeffizienten  $\alpha_S$  des Materials, welches in den Raum auf einer Fläche  $S$  eingebracht ist, der Nachhallzeit  $T_r$  dieses Raumes und der Höhe seiner Decke  $h$ .

Vor der Einführung des absorbierenden Materials könnte die äquivalente Absorptionsfläche wie folgt beschrieben werden:

$$A_0 = 0,25 \cdot k_0 \cdot S.$$

Die äquivalente Absorptionsfläche  $A_0$  wird durch Tische und Stühle gebildet, deren Anzahl von der Bodenfläche des Raumes  $S$  abhängt, und durch die geringe Absorption, die der schwach absorbierenden Flächen der Wände, des Bodens und der Decke entspricht. Das Verhältnis der gesamten Innenflächen des Raumes und der Bodenfläche hängt von den Dimensionen des Raumes ab. Der Faktor  $k_0$  hängt von diesen Dimensionen ab:  $k_0$  ist zwischen 1 (für große Bodenflächen und niedrige Decken) und 1,5 (für kleine Bodenflächen und hohe Decken).

Wenn ein absorbierendes Material mit der Fläche  $S$  in einen Raum eingebracht wird, wird  $A_0$  zu  $A$ :

$$A = 0,25 \cdot k_0 \cdot S + \alpha_S \cdot S = (0,25 \cdot k_0 + \alpha_S) \cdot S \quad [19]$$

$$\text{Sabine-Formel / formula: } T = \frac{0,16 \cdot V}{A} \quad [2]$$

wobei  $V$  das Raumvolumen in  $m^3$  ist.

$$T = \frac{0,16 \cdot S \cdot h}{(0,25 \cdot k_0 + \alpha_S) \cdot S} = \frac{0,16 \cdot h}{0,25 \cdot k_0 + \alpha_S} \quad [20]$$

Die nachstehende Grafik und Tabelle illustrieren diese Formel.

**A5-3.3.3 Calculation****A5-3.2.3.1 Reverberation time**

The calculation of the surface area of absorbing material needed in a room does not require a complicated study. The required area depends on the dimensions of the room in which the reverberation time shall be controlled. The first measurement should be taken in the unoccupied, fully furnished room. When the room is empty and when it has the normal parallelepipedic (box-shaped) dimensions, with only the ceiling covered with sound-absorbing material, it is impossible to measure correctly the real reverberation time, because the sound energy is reflected around the room by walls and partitions before reaching the absorbing surface at the ceiling. When this room is furnished, tables and chairs create diffraction effects and correct measurements can be obtained. However, it is difficult in this case to take into account the sound absorption of the furniture surfaces. The number of students allowed to be in a classroom depends on the surface of the room, as does the amount of furniture. An evaluation of a large number of measurements taken in furnished classrooms with parallelepipedic dimensions, without any absorbing material on walls or ceiling, shows that the mean equivalent sound absorption area of a classroom is about  $0,25 \cdot S$ , where  $S$  is the surface of the floor. Thus, a relation exists between the absorption coefficient  $\alpha_S$  of the material to be introduced into the room on a surface  $S$ , the reverberation time  $T_r$  of this room and the height of the ceiling  $h$ .

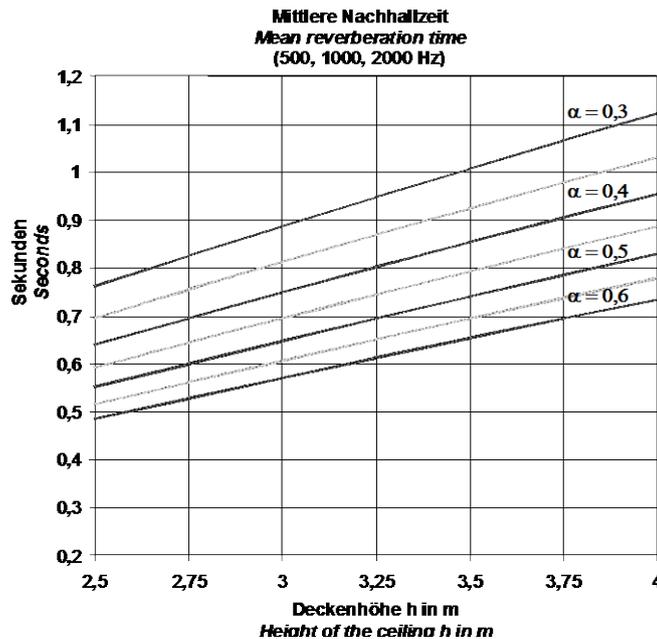
Before the introduction of the absorbing material, the equivalent absorption area of the room could be written by the following formula:  $A_0 = 0,25 \cdot k_0 \cdot S$ .

The equivalent absorption area  $A_0$  is constituted by the tables and chairs, the number of which depends on the surface of the room floor  $S$ , and by the little absorption which corresponds to the low absorbing surfaces of the walls, the floor and the ceiling. The ratio of the total inner surface of the room and the floor surface depends on the dimensions of the room. The factor  $k_0$  depends on these dimensions:  $k_0$  is between 1 (for large floor surfaces and low ceilings) and 1,5 (for small floor surfaces and high ceilings).

When the absorbing material with the surface  $S$  is introduced in the room,  $A_0$  becomes  $A$ :

where  $V$  is the room volume in  $m^3$ .

The next graph and table illustrate this formula.



**Bild 16:** Verhältnis zwischen der Nachhallzeit  $T_r$ , der Höhe der Decke und dem Absorptionskoeffizienten  $\alpha$  eines absorbierenden Materials, welches eine Fläche  $S$ , äquivalent zur Bodenfläche des Raumes, bedeckt. Die Ergebnisse weisen eine Genauigkeit von  $\pm 10\%$  auf

**Figure 16:** Relation between the reverberation time  $T_r$ , the height of the ceiling and the absorption coefficient  $\alpha$  of an absorbing material covering a surface  $S$ , equivalent to the floor surface of the room. The results are given with a precision of  $\pm 10\%$

Für eine Bodenfläche  $S$ , eine Deckenhöhe  $h$  und eine angestrebte Nachhallzeit  $T_r$ , gibt die Grafik den benötigten Absorptionskoeffizienten  $\alpha_S$  an, wenn die verfügbare Fläche der Fläche  $S$  entspricht.

For a floor surface  $S$ , a height of the ceiling  $h$  and a desired reverberation time  $T_r$ , the graph gives the required absorption coefficient  $\alpha_S$  if the available surface is equivalent to  $S$ .

**Beispiel:** Bodenfläche  $S = 7,2 \text{ m} \cdot 10,8 \text{ m} = 78 \text{ m}^2$   
Deckenhöhe:  $h = 3,25 \text{ m}$   
Angestrebte Nachhallzeit (Mittel in den Oktaven 500, 1000 und 2000 Hz):  $T_r = 0,8 \text{ s}$   
Mittlerer Absorptionskoeffizient, der auf einer Fläche  $S$  eingeführt werden muss:  $\alpha_S = 0,4$

**Example:** Floor surface  $S = 7,2 \text{ m} \cdot 10,8 \text{ m} = 78 \text{ m}^2$   
Height under ceiling:  $h = 3,25 \text{ m}$   
Desired reverberation time (mean in octaves 500, 1000 and 2000 Hz):  $T_r = 0,8 \text{ s}$   
Mean absorption coefficient to be introduced on a surface  $S$ :  $\alpha_S = 0,4$

Wenn ein absorbierendes Material mit einem Absorptionskoeffizienten 0,6 bevorzugt wird, ist die benötigte Fläche  $0,4/0,6 \cdot S = 0,66 \cdot S$ . Das entspricht in diesem Beispiel  $52 \text{ m}^2$ . In anderen Worten, wenn die gesamte Deckenfläche nicht für den Einbau des absorbierenden Materials zur Verfügung steht (Oberlichter), muss der Absorptionskoeffizient  $\alpha_S$  erhöht werden.

If an absorbing material with an absorption coefficient 0,6 is preferred, then the required surface area can be  $0,4/0,6 \cdot S = 0,66 \cdot S$ . In this example, it corresponds to  $52 \text{ m}^2$ . In other words, if the entire ceiling is not available for the employment of absorbing material (sky lights), the absorption coefficient  $\alpha_S$  must be increased.

Dasselbe Ergebnis kann mittels Tabelle 15 bestimmt werden, wobei  $S$  die Bodenfläche in  $\text{m}^2$  eines parallelepipedalen Raumes ist. Diese Tabelle gibt die Fläche absorbierenden Materials an, welche in den Raum eingebracht werden muss.

The same result can be determined using Table 15, where  $S$  is the floor surface in  $\text{m}^2$  of a parallelepipedic room. This table gives the surface of absorbing material which is to be introduced in the room.

$\alpha$	Raumhöhe h in Metern Room height h in meters						
	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4
0,30	0,95 S	1,10 S	1,20 S	1,35 S	1,50 S	1,65 S	1,80 S
0,35	0,80 S	0,90 S	1,05 S	1,15 S	1,30 S	1,40 S	1,50 S
0,40	0,70 S	0,80 S	0,90 S	<b>1,00 S</b>	1,15 S	1,25 S	1,35 S
0,45	0,60 S	0,70 S	0,80 S	0,90 S	1,00 S	1,10 S	1,20 S
0,50	0,55 S	0,65 S	0,75 S	0,80 S	0,90 S	1,00 S	1,05 S
0,55	0,50 S	0,60 S	0,65 S	0,75 S	0,85 S	0,90 S	1,00 S
0,60	0,45 S	0,55 S	0,60 S	<b>0,70 S</b>	0,75 S	0,85 S	0,90 S

**Tabelle 15:** Fläche, die mit absorbierendem Material bedeckt werden muss, wenn eine Nachhallzeit von  $T_r = 0,8 \text{ s}$  erreicht werden soll

**Table 15:** Surface to be covered with an absorbing material when  $T_r = 0,8 \text{ s}$  is to be reached

**Beispiel:** Bodenfläche  $S = 7,2 \text{ m} \cdot 10,8 \text{ m} = 78 \text{ m}^2$   
 Deckenhöhe:  $h = 3,25 \text{ m}$   
 Angestrebte Nachhallzeit (Mittel in den Oktaven 500, 1000 und 2000 Hz):  $T_r = 0,8 \text{ s}$   
 Mittlerer Absorptionskoeffizient, der auf einer Fläche  $S$  eingeführt werden muss:  $\alpha_s = 0,4$

Wenn ein absorbierendes Material mit einem Absorptionskoeffizienten 0,6 bevorzugt wird, kann die bedeckte Fläche  $0,4/0,6 \cdot S = 0,70 \cdot S$  sein. Das entspricht in diesem Beispiel  $54,6 \text{ m}^2$ . In Tabelle 4 sind die Werte auf 0,05 gerundet.

Mit der Grafik oder der Tabelle kann die erforderliche Fläche, die mit absorbierendem Material bedeckt werden muss, leicht bestimmt werden.

Die Raumdecken werden oft als bevorzugte Fläche zur Abdeckung mit absorbierendem Material angesehen. Wenn jedoch die beste Sprachverständlichkeit in einem Raum erzielt werden soll, zeigt das nachfolgende Beispiel, dass die Decke nicht die vorzugsweise zu behandelnde Fläche ist.

#### A5-3.3.3.2 Sprachverständlichkeit

In diesem Beispiel entspricht der erste Fall einem Raum ohne Absorptionsbehandlung, in dem das Hintergrundgeräusch nahe 35 dB(A) ist. Die Verständlichkeit, abgeschätzt mit dem RASTI-Index (schneller Sprachübertragungsindex) ist schlecht, ausgenommen die ersten beiden Reihen vor dem Sprecher.

Der zweite Fall entspricht demselben Raum, wobei 70 % der Deckenfläche mit Absorptionsmaterial mit einem Absorptionskoeffizienten 0,6 bedeckt ist. Es wird eine annehmbare Nachhallzeit erreicht, aber die Sprachverständlichkeit ist schlecht.

Der dritte Fall entspricht demselben Raum mit demselben Anteil absorbierender Fläche wie im vorigen Fall, jedoch an der Decke und an der Wand hinter der letzten Sitzreihe der Studenten angebracht. Es ist unnütz, diese Wand unterhalb von 1,20 m zu verkleiden, da unterhalb dieser Grenze die Studenten das absorbierende Material verdecken. Die Verständlichkeit ist an allen Hörerplätzen ziemlich gut.

Der vierte Fall entspricht demselben Raum mit derselben Menge absorbierenden Materials wie in den beiden letzten Fällen, jedoch ausschließlich an den Wänden angebracht, ohne irgendwelches absorbierendes Material an der Decke. Hier ist die Verständlichkeit in der Nähe des Sprechers ausgezeichnet und ziemlich gut an allen anderen Plätzen. Diese Ausstattung ist in „Sprachräumen“ zu benutzen, in denen die Verständlichkeit der wichtigste Gesichtspunkt ist.

**Example:** Floor surface  $S = 7,2 \text{ m} \cdot 10,8 \text{ m} = 78 \text{ m}^2$   
 Height under ceiling:  $h = 3,25 \text{ m}$   
 Desired reverberation time (mean in octaves 500, 1000 and 2000 Hz):  $T_r = 0,8 \text{ s}$   
 Mean absorption coefficient to be introduced on a surface  $S$ :  $\alpha_s = 0,4$

If an absorbing material with an absorption coefficient 0,6 is preferred, than the surface covered can be  $0,4/0,6 \cdot S = 0,70 \cdot S$ . In this example, it corresponds to  $54,6 \text{ m}^2$ . In Table 4, the values are rounded off 0,05.

With the graph or table, we can easily determine the required area to be covered by the chosen absorbing material.

The ceilings of rooms are often considered the preferred surface for coverage with absorbing material. But, if we want to obtain the best intelligibility of speech in the room, the following example shows that the ceiling is not the best area to treat.

#### A5-3.2.3.2 Intelligibility of speech

In this example, the first case corresponds to a room without absorption treatment in which the background noise is near 35 dB(A). Intelligibility, estimated by the RASI index (Rapid Speech Transmission Index) is bad, except for the two first ranges, near to the speaker.

The second case corresponds to the same room with 70% of the ceiling area covered with an absorbing material of an absorption coefficient 0,6. An agreeable reverberation time is obtained, but the intelligibility of speech is poor.

The third case corresponds to the same room, with the same quantity of absorption as in the previous case, but employed on the ceiling and on the wall behind the last range of students. It is not useful to cover this wall under 1,20 m height, because under this limit students will mask the absorbing material. The intelligibility is quite good at all students' places.

The fourth case corresponds to the same room, with the same quantity of absorbing material as in the two last configurations, but only employed on walls, without any absorbing material on the ceiling. Then, the intelligibility is excellent near the speaker and very good on other places. This treatment is to be used in a "language room" in which intelligibility is most important.

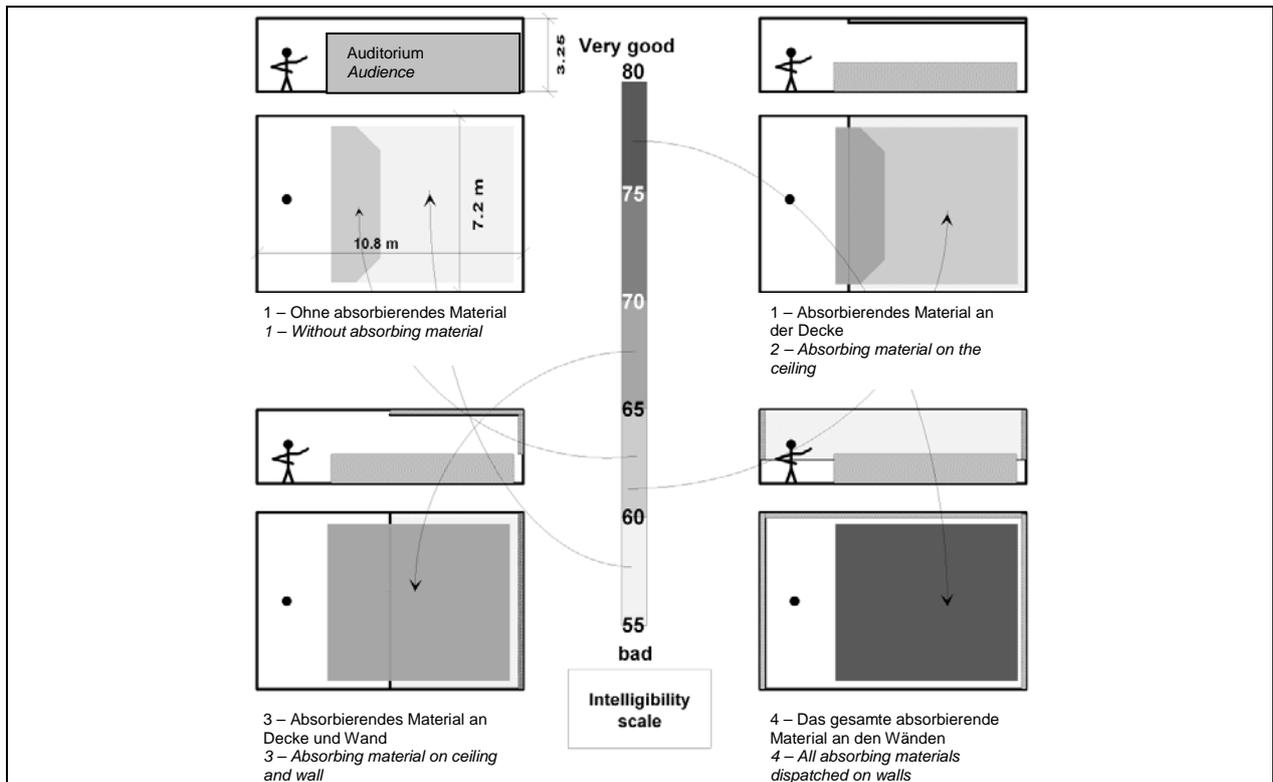


Bild 17: Sprachverständlichkeit in einem Klassenraum

Figure 17: Intelligibility of speech in a classroom

Absorbierendes Material an Wänden wird oft mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt und es ist ratsam, Mineralwolle mit einem Lochblech oder einer perforierten Gipskartonplatte abzudecken.

Absorbing material on walls is often exposed to various shocks and it is prudent to use mineral wool covered by a perforated metal sheet or a perforated plaster board.

#### A5-3.4 Arbeitsräume

#### A5-3.4 Workshops

##### A5-3.4.1 Allgemeines

##### A5-3.4.1 General

Wegen Schall emittierender Maschinen, Werkzeuge, Ausrüstungen, usw. in Arbeitsbereichen (Werkstatt, Baustelle, Büro) sind Geräusche zum vorherrschenden Störfaktor an beruflichen Arbeitsplätzen in den Industrienationen geworden.

Caused through sound-emitting machinery, tools, equipment, etc. in work areas (workshop, building site, office), noise has become the dominating irritation factor at the professional workplace in industrialised countries.

Die große Anzahl an Berufstätigen, die Lärm ausgesetzt sind, und die nachteiligen Effekte der Lärmbelastung sowohl für den betroffenen Einzelnen als auch für die Gesellschaft als Ganzes haben dazu geführt, dass Lärmschutzmaßnahmen ein unabhängiges Problem im Gesamtzusammenhang der Betriebssicherheit geworden sind. Eine umfangreiche Gesetzgebung ist entstanden, die Zielvorstellungen, Verantwortlichkeiten und Schritte zur Vermeidung oder Begrenzung von Lärmbelastung festlegt.

The large numbers of employees exposed to noise and the disadvantageous effects of noise exposure both for the exposed individual and the society as a whole have led to noise protection becoming an independent issue within the framework of industrial safety. A complex legislation has emerged, defining aims, responsibilities and steps to the avoidance or limitation of noise exposure.

Die Gesetzgebung umfasst sowohl von der Regierung ausgehende Gesetze (Richtlinie 2003/10/EU vom 06.02.2003) und Verordnungen als auch Anleitungen von Berufskrankenkassen in Form von Unfallverhütungsvorschriften (UVV) und zahlreiche Normen und Anleitungen.

The legislation embraces governmental laws (Directive 2003/10/EU of 06.02.2003) and regulations as well as guidance given by professional health insurance companies in the form of health-hazard prevention directives (UVV) and numerous standards and guidance papers.

Nationale Lärmschutzanforderungen sind Teil der EU-Gesetzgebung geworden. Die EU-Gesetzgebung erfolgt vorwiegend in Form von Dach- bzw. speziellen Führungspapieren bezüglich

National noise protection requirements have become part of EU legislation. The EU legislation predominantly takes place in the form of umbrella and special guidance papers regarding the

- Entwurf und Verkauf von Maschinen, Werkzeugen, Einrichtungen und allgemein zugänglicher Güter als auch
- der Verbesserung des Arbeitsumfeldes mit dem Ziel der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes für den Arbeitnehmer.

- design and placing on the market of machinery, tools, installations and common user goods as well as
- the improvement of the workplace surroundings aiming at work safety and health protection for employees.

Sowohl EU- als auch nationale Lärmschutzanforderungen sind nach folgendem Konzept organisiert:

Both EU and national noise protection requirements are organised according to the following concept:

Die Vermeidung und Minimierung von Gesundheitsrisiken bis hin zum jeweils möglichen Lärmminimum gemäß dem Stand der Technik hat Vorrang gegenüber der Vermeidung von Lärmrisiken durch personengebundene Schutzvorkehrungen und Forderungen an individuelles Verhalten.

#### A5-3.4.2 Anforderungen und Empfehlungen

Bezüglich des Entwurfs und des Verkaufs von Maschinen, Einrichtungen, usw. ist die folgende Information zum Lärm Teil der oben erwähnten Gesetzgebung (wegen Einzelheiten siehe Richtlinie 89/37/EC):

- Wenn ein A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel von 70 dB(A) an Arbeitsplätzen überschritten wird; wenn der Pegel 70 dB(A) nicht überschreitet, muss dieses nur gekennzeichnet werden.
- Wenn der Höchstwert des momentanen C-bewerteten Schalldrucks an Arbeitsplätzen den Wert 63 Pa überschreitet (130 dB im Verhältnis zu 20 µPa).
- Von Maschinen emittierter Schalleistungspegel, wenn ein bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel am Arbeitsplatz 85 dB(A) überschreitet.

Im Falle sehr großer Maschinen ist anstelle des Schalleistungspegels der bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel an festgelegten Positionen im Umfeld der Maschine anzugeben.

Zusätzliche Informationen sind erforderlich über:

- Die Betriebs- und Einsatzbedingungen, die zu den vom Hersteller deklarierten Emissionswerten gehören.
- Die Messvorschriften, die für die Messungen benutzt worden sind, auf denen die Informationen basieren.

Für die Verbesserung des Arbeitsumfeldes verlangt die Gesetzgebung, dass der Lärmpegel an Arbeitsplätzen so niedrig wie möglich gehalten wird.

Zur Abschätzung der Risiken für Gesundheit und Sicherheit, besonders wegen der Gefahr für das Gehör der Arbeitnehmer, sind die physikalischen Parameter wie folgt definiert (siehe 2003/10/EC für weitere Einzelheiten):

- Schalldruckpegel  $P_{\text{peak}}$ : entspricht dem Höchstwert des C-Frequenz-bewerteten Dauerschalldruckpegels,
- täglicher Lärmbelastungspegel ( $L_{\text{Ex,8h}}$  dB(A) re 20 µPa),
- wöchentlicher Lärmbelastungspegel ( $L_{\text{Ex,8h}}$  dB(A) re 20 µPa), beides gemäß ISO 1999:1990.

Die „Immissionsgrenzwerte“ und die „Arbeitswerte“ sind:

- Immissionsgrenzwerte:  $L_{\text{Ex,8h}} = 87$  dB(A),  $P_{\text{peak}} = 200$  Pa (140 dB(C) re 20 µPa)
- Obere Arbeitsbelastungswerte:  $L_{\text{Ex,8h}} = 85$  dB(A),  $P_{\text{peak}} = 200$  Pa (137 dB(C) re 20 µPa)
- Untere Arbeitsbelastungswerte:  $L_{\text{Ex,8h}} = 80$  dB(A),  $P_{\text{peak}} = 112$  Pa (135 dB(C) re 20 µPa)

Die oben erwähnten Immissionsgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden. Zur Bestimmung der tatsächlichen Belastung eines Arbeitnehmers wird der dämpfende Effekt des persönlichen Geräuschschutzes für die Grenzwerte der Belastung herangezogen. Für die Bestimmung der Grenzwerte wird der Einfluss solcher persönlichen Geräuschschutzes nicht in Betracht gezogen.

Eine Lärmbelastung eines Arbeitnehmers im Bereich des unteren Grenzwertes und darüber macht es für die Arbeitgeber gesetzlich erforderlich, den Arbeitnehmer über die Risiken und Konsequenzen der Lärmbelastung zu unterrichten. Beim Überschreiten des oberen Grenzwertes ist der Arbeitnehmer berechtigt, medizinische Unterstützung in Anspruch zu nehmen mit dem Ziel, Hörverlust, verursacht durch Lärmbelastung, und eine Einschränkung des Hörvermögens zu vermeiden.

The avoidance and the minimisation of health hazards down to the respective possible noise minimum according to the state of the art take precedence over the avoidance of noise hazards through personal protection and demands on individual behaviour.

#### A5-3.4.2 Requirements and recommendations

Regarding the design and the placing on the market of machinery, installations, etc., the following information on noise is required as part of the legislation mentioned above (see directive 89/37/EC):

- If an equivalent continuous A-weighted sound pressure level at workstations exceeds 70 dB(A); does not exceed 70 dB(A), this fact must be indicated.
- Peak C-weighted instantaneous sound pressure value at workstations, where this exceeds 63 Pa (130 dB in relation to 20 µPa).
- Sound power level emitted by the machinery where the equivalent continuous weighted sound pressure level at workstations exceeds 85 dB(A).

In case of very large machinery, instead of the sound power level, the equivalent continuous sound pressure levels at specified positions around the machinery may be indicated.

Additional information is required about:

- The operating and installation conditions that are associated with these manufacturer-declared emission values.
- The measuring rules used for the measurements on which this information is based.

Regarding the improvement of the professional environment, legislation demands that the noise level in work areas shall be kept as low as possible.

For an assessment of the hazards to health and safety, especially any dangers for the hearing of employees, the physical parameters used are defined as follows (see 2003/10/EC for more details):

- sound pressure level  $P_{\text{peak}}$ : corresponding to the maximum value of C-frequency-weighted instantaneous sound pressure level,
- daily noise exposure level: ( $L_{\text{Ex,8h}}$  dB(A) re 20 µPa),
- weekly noise exposure level: ( $L_{\text{Ex,8h}}$  dB(A) re 20 µPa), both according to ISO 1999:1990.

The exposure "limit" levels and "action values" are:

- Exposure limit values:  $L_{\text{Ex,8h}} = 87$  dB(A),  $P_{\text{peak}} = 200$  Pa (140 dB(C) re 20 µPa)
- Lower exposure action values:  $L_{\text{Ex,8h}} = 85$  dB(A),  $P_{\text{peak}} = 200$  Pa (137 dB(C) re 20 µPa)
- Lower exposure action values:  $L_{\text{Ex,8h}} = 80$  dB(A),  $P_{\text{peak}} = 112$  Pa (135 dB(C) re 20 µPa)

Limit exposure values mentioned above shall not be exceeded. For the determination of the effective exposure of an employee, the attenuating effect of personal noise protection is taken into account regarding the limit values of exposure. For the determination of threshold values, the effect of such personal noise protection is not taken into consideration.

A noise exposure of an employee in the range of the minimum threshold values an above makes it mandatory for employers to inform the employee about the risks and consequences of noise exposure. When transgressing the maximum threshold value, the employee is entitled to medical support with the aim to avoid hearing loss caused by noise exposure and a degradation of the functioning of his hearing capacity.

Zusätzlich empfehlen nationale und europäische Richtlinien, dass an Arbeitsplätzen in Arbeitsbereichen die Beurteilungspegel (siehe A2-5.4) – einschließlich der Außengeräusche - folgende Werte nicht übertreffen sollten:

- für vornehmlich geistige Arbeiten: 55 dB(A),
- für einfache und vornehmlich mechanische oder ähnliche Arbeiten: 70 dB(A),
- in Pausen-, Bereithalte-, Erholungs- und medizinischen Räumen darf der Beurteilungspegel, erzeugt durch Lärm von Einrichtungen innerhalb des Raumes oder durch Lärm von außen, maximal 55 dB(A) betragen.

Die wichtigste Norm, die bezüglich der Anforderungen, die in der Gesetzgebung niedergelegt sind, eingehalten werden muss, ist EN 11690, eine Norm, die sowohl u. a. die Ziele, den grundsätzlichen Aufbau und die Ausführungsschritte für eine Lärmschutz-Auslegung neuer und bestehender Arbeitsbereiche (Teil 1) als auch Lärminderungsmaßnahmen (Teil 2) beschreibt. Als grundsätzliche Ziele – eine Entsprechung zu den oben erwähnten höchstzulässigen Werten – werden die folgenden Immissions- / Belastungswerte angegeben:

Für industrielle Arbeitsplätze weniger als 75 dB(A) bis 80 dB(A)

Für normale Büroarbeiten weniger als 45 dB(A) bis 55 dB(A)

For Arbeit, die eine besondere Konzentration erfordert, weniger als 35 dB(A) bis 45 dB(A)

Insbesondere bezüglich Arbeitsplätzen enthält EN 11690-1 sowohl wünschenswerte Referenzwerte für die entfernungsabhängige Schalldruckpegelabnahme als auch für den Hintergrundgeräuschpegel in verschiedenen Raumtypen (z. B. Großraumbüros, industrielle Arbeitsplätze, usw.) für die Planung und Bewertung der akustischen Qualität.

Additionally, national and European directives recommend that the noise rating levels (see A2-5.4) at workstations in work areas – including noise coming from the outside – shall not exceed:

- for predominantly metal work: 55 dB(A),
- for simple and predominantly mechanical or similar work: 70 dB(A),
- in rest, standby, recreation and medical rooms, the evaluation level, caused by noise of installations inside the room and through noise coming in from the outside, shall at a maximum be 55 dB(A).

The most important standard to be met regarding the requirements laid down in the legislation is EN 11690, describing amongst other things the aims, principles of design and execution steps for the noise protective layout of new and existing workstations (Part 1) as well as noise reduction measures (Part 2). As principal aims – an equivalent to the maximum acceptable values mentioned before – the following immission / exposure values have been given:

In industrial workstations less than 75 dB(A) to 80 dB(A)

For common office work less than 45 dB(A) to 55 dB(A)

For work requiring special concentration less than 35 dB(A) to 45 dB(A)

Especially regarding workplaces, EN 11690-1 also contains desirable reference values for the distance-related sound pressure level decrease as well as for the background noise level in different room types (e. g. large office halls, industrial workstations, etc.) for the planning and evaluation of the acoustic quality.

Raumtyp <i>Type of room</i>	$L_{Aeq}$ dB(A)
Konferenzraum <i>Conference room</i>	30 bis / to 35
Klassenraum <i>Classroom</i>	30 bis / to 40
Einzelbüro <i>Individual office</i>	30 bis / to 40
Großraumbüro <i>Large office hall</i>	35 bis / to 45
Industrielle Laboratorien <i>Industrial laboratories</i>	35 bis / to 50
Überwachungs- und Steuerräume in der Industrie <i>Control and steering rooms in industry</i>	35 bis / to 55
Industrielle Arbeitsplätze <i>Industrial workstations</i>	65 bis / to 70

**Tabelle 16: Empfohlene Höchstwerte für Hintergrundgeräuschpegel**

**Table 16: Recommended maximum values for background noise levels**

Anmerkung: Das Hintergrundgeräusch rührt von eingebautem technischen Gerät (z. B. Klimaanlage) her oder wird von der Umgebung abgestrahlt.

Note: The background noise stems from installed technical equipment (e. g. air-conditioning systems) or are radiated in from the environment.

Raumvolumen <i>Room volume</i> $m^3$	Nachhallzeit <i>Reverberation time</i> s	Schalldruckpegelabnahme pro Entfernungsverdoppelung <i>Sound pressure level decrease per doubling of distance</i> $DL_2$ dB
kleiner als 200 <i>smaller than 200</i>	weniger als 0,5 bis 0,8 <i>less than 0,5 to 0,8</i>	-
zwischen 200 und 1000 <i>between 200 and 1000</i>	zwischen 0,8 und 1,3 <i>between 0,8 and 1,3</i>	
größer als 1000 <i>larger than 1000</i>	-	größer als 3 bis 4 <i>larger than 3 to 4</i>

**Tabelle 17: Empfohlene akustische Eigenschaften für Arbeitsräume**

**Table 17: Recommended acoustic qualities of workrooms**

Anmerkung: Diese Empfehlungen sind z. B. eingehalten, wo der durchschnittliche Absorptionsgrad eines Raumes größer als 0,3 oder die äquivalente Absorptionsfläche größer als das 0,6- bis 0,9-fache der Bodenfläche ist. In flachen Räumen (keine Diffusfeldbedingungen) sind die äquivalente Absorptionsfläche oder die Schalldruckpegelabnahme die bevorzugten Merkmale.

In anderen Richtlinien werden Räume / Bereiche als Lärmbereiche definiert, wenn der örtliche Bewertungspegel 85 dB(A) erreicht oder übertrifft oder wenn der Höchstwert des nicht bewerteten Schalldruckspitzenpegels  $L_{\text{peak}}$  140 dB erreicht oder übertrifft.

Es ist zu beachten, dass Lärmbereiche sich verschieben können, z. B. im Falle mobiler Maschinen oder tragbarer Ausrüstung. Wenn z. B. tragbare Lärmemissionsquellen für Arbeiten benutzt werden, um außerhalb lokaler Lärmbereiche zu arbeiten, muss der persönliche Beurteilungspegel an die Stelle des örtlichen Beurteilungspegels treten.

Lärmbereiche sind zu bestimmen und fachgerecht zu kennzeichnen.

Für Lärmbereiche, die gekennzeichnet werden müssen, ist ein Programm technischer Maßnahmen (Lärmminierungsplan) nach dem Stand der Technik zu bestimmen und durchzuführen.

#### A5-3.4.3 Abwicklung von Lärmminierung (Lärmschutz)

1. Die Vorausberechnung von Schall in Arbeitsbereichen ist ein Instrument für Entscheidungen über Lärmminierungsmaßnahmen. Sie bietet die Möglichkeit, den Schalldruckpegel an jedem Punkt zu berechnen und die Werte zu bestimmen, von denen die Schallausbreitung abhängt. Auf diese Weise können die Werte mit den erforderlichen bzw. den Grenzwerten und den verschiedenen Lösungsmöglichkeiten für mögliche Maßnahmen verglichen werden (bezüglich der Anforderungen siehe A5-3.4.2).
2. Basis der Vorausberechnung von Schall an Arbeitsplätzen ist die Bestimmung der Verteilung von Schalldruckpegeln einer Punktquelle, die gleichzeitig in alle Richtungen abstrahlt. Diese Verteilung wird bestimmt durch:
  - Form und Volumen des Raumes
  - Absorption an seinen Wandflächen und dem Mobiliar.

EN ISO 11690-3 empfiehlt die Vorausberechnung von Lärm in Arbeitsbereichen in den fünf unten beschriebenen Schritten:

Note: These recommendations are e. g. kept where the average absorption degree of the room exceeds 0,3 or the equivalent absorption area is larger than 0,6- to 0,9-times the floor surface. In flat rooms (non-diffuse field conditions), the equivalent absorption area or the sound pressure level decrease are the preferred criteria.

In other guidelines, the rooms / areas are defined as noise areas where the local evaluation level reaches or exceeds 85 dB(A) or where the maximum of the non-weighted sound pressure peak level  $L_{\text{peak}}$  reaches or exceeds 140 dB.

Attention must be paid to the fact that noise areas can change their locations, e. g. in case of mobile machinery or portable equipment. If e. g. portable noise emitters are used for work outside local noise areas, the personal evaluation level must be used instead of the local evaluation level.

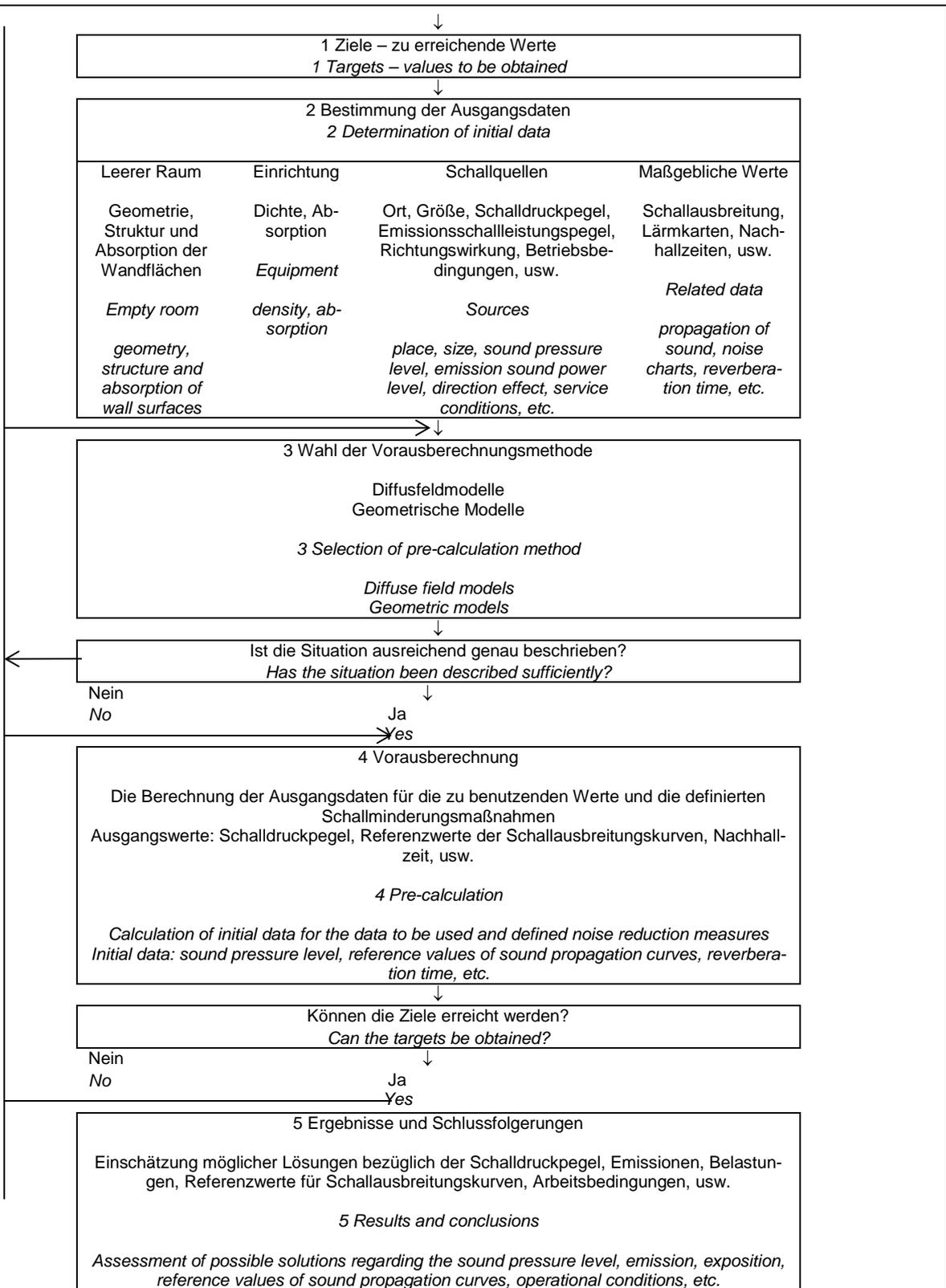
Noise areas shall be determined and marked professionally.

For noise areas that need to be marked, a programme of technical measures (noise reduction programme) according to the state of the art has to be established and executed.

#### A5-3.4.3 Dealing with noise reduction (noise control)

1. The pre-calculation of sound in work areas is a tool for decisions on reduction measures. It provides the possibility to calculate the sound pressure level at any point and to determine the values governing the propagation of sound. Thus, these values can be compared (for requirements see A5-3.4.2).
2. Basis for the pre-calculation of sound in workplaces is the determination of the distribution of sound pressure levels of a point source simultaneously radiating in all directions. This distribution is influenced by:
  - form and volume of the room
  - absorption at its wall surfaces and the furniture.

EN ISO 11690-3 recommends the pre-calculation of sound in work areas in the five steps described below:



**Tabelle 18: Die fünf Schritte für die Bestimmung von Maßnahmen zur Lärminderung**

**Table 18: The five steps for the determination of the noise decrease solutions**

**Schritt 1: Ziele – Zielwerte**

3. Am Anfang der Vorausberechnung von Geräuschen müssen die betroffenen Parteien die akustischen Referenzwerte auswählen, wobei die verschiedenen Randbedingungen, die durch dieses Projekt entstehen, einbezogen werden müssen, und die Zielwerte definieren. Mögliche Referenzwerte können sein: Schalldruckpegel am Arbeitsplatz, Emissions- und/oder Immissionswerte, Nachhallzeit, usw.

**Schritt 2: Definition der Ausgangsdaten**

Die Ausgangsdaten für die Merkmale und die Schallquellen müssen beschrieben werden. Die Situation sowie der Charakter und die Ausführlichkeit dieser Beschreibung führen zu so genannten Beschreibungsgrößen, die zur Wahl der Berechnungsmethode führen.

4. Der leere Raum ist ein Volumen, welches durch die Begrenzungsflächen des Raumes und die Größe der inneren Oberflächen beschrieben ist. Solche Flächen sind z. B. die Begrenzungsflächen eines Arbeitsraumes (Wände, Decke, Boden) und große innere Flächen im Raum (Schirme, Zwischenwände, Kapseln, Kabinen, usw.). Für die Vorausberechnung müssen diese Referenzwerte der den Raum begrenzenden Flächen, z. B. Geometrie (Position, Abmessungen, Form) und die Absorptions- und Reflexionseigenschaften bekannt sein.

**Step 1: Targets – target values**

3. At the start of a pre-calculation of noise, the parties concerned must select the acoustic reference values, taking into account the different fringe conditions caused by the project, and define their target values. Possible reference values may be: sound pressure level at the workplaces, emission and/or exposition data, reverberation times, etc.

**Step 2: Definition of initial data**

The initial data regarding the character of the empty room, the room equipment and the sound sources must be described. The situation as well as the character and extensiveness of the description result in so-called description intensities, which lead to the selection of the calculation method.

4. The empty room is the volume defined by the limiting areas of the room and the large internal surfaces. Such surfaces are e. g. the surfaces limiting the workroom (walls, ceiling, floor) and large interior surfaces in the room (umbrellas, separating walls, capsules, cabins, etc.). For the pre-calculation, these reference values of the surfaces limiting the room, e. g. geometry (position, dimensions, form, etc.) and the absorption and reflection properties must be known.

Grad der Beschreibung <i>Degree of description</i>	Absorption und Geometrie des Raumes <i>Absorption and geometry of the room</i>
1	Der Raum wird definiert durch sein Volumen und das durchschnittliche Absorptionsmaß der begrenzenden Oberflächen <i>The room is defined through its volume and the average degree of sound absorption of its limiting surfaces</i>
2	Kubische Geometrie. Jede einzelne Fläche ist durch einen einheitlichen Schallabsorptionsgrad beschrieben <i>Cubic geometry. Each individual surface is defined by a common degree of sound absorption</i>
3	Kubische Geometrie. Unterscheidung der Begrenzungsflächen in Elemente mit unterschiedlichen Schallabsorptionsgraden <i>Cubic geometry. Distinction of limiting surfaces in elements with differing degrees of sound absorption</i>
4	Tatsächliche Raumgeometrie. Verteilung der unterschiedlich absorbierenden und reflektierenden Oberflächen <i>Actual geometry of the room. Distribution of differently absorbing and reflecting surfaces</i>

**Tabelle 19: Absorption und Geometrie des Raumes****Beschreibung der Raumausstattung**

5. Die Ausstattung umfasst alle Gegenstände im Raum, die einen Einfluss auf die Schallausbreitung haben. Ausstattungsgegenstände sind Maschinen, Vorräte, Schallschirme, Kabinen, usw. Sie können im Vorausberechnungsmodell als Gesamtheit betrachtet werden oder sie können bezüglich ihrer individuellen akustischen Eigenschaften unterschieden werden.

Anmerkung: Die Ausstattung kann als durchschnittliche Dicke von Diffusoren  $q$  beschrieben werden:  $q = S/(4 \cdot V)$  in  $m^{-1}$ , mit  $S$  als Gesamtoberfläche der Ausstattung in  $m^2$  und  $V$  als Raumvolumen oder Bereich, an dem sich die Ausstattungsgegenstände befinden.

**Table 19: Absorption and geometry of the room****Description of the room equipment**

5. The equipment is formed by all items in the room which has an effect on sound propagation. Equipment items are machines, stockpiles, sound screens, cabins, etc. They may be considered as a total in the pre-calculation model or differentiated regarding their individual acoustical properties.

Note: The equipment can be described as the average density of diffusers  $q$ :  $q = S/(4 \cdot V)$ , with  $S$  as the total surface of the equipment in  $m^2$  and  $V$  as the volume of the room or of the area where the equipment items are located.

Grad der Beschreibung <i>Degree of description</i>	Beschreibung der Raumausstattung <i>Description of room equipment</i>
1	Ausstattungsgegenstände werden vernachlässigt <i>Equipment items are disregarded</i>
2	Die gesamte Ausstattung des Raumes ist als ein Wert für ihre Durchschnittsdichte und ein anderer Wert für ihre durchschnittliche Absorption beschrieben <i>The entire equipment of the room is described in one value for its average density and another value for its average absorption</i>
3	Die Raumausstattung wird für verschiedene Teile des Raumes unterschiedlich durch ihre jeweilige Durchschnittsdichte und Durchschnittabsorption beschrieben <i>The room equipment is described for different parts of the room through the respective average density and average absorption</i>
4	Tatsächliche Form und Installation der Ausstattungsgegenstände werden berücksichtigt. Abschirmung und Reflexion durch jedes einzelne dieser Hindernisse werden in Betracht gezogen <i>Actual form and installation of the equipment items are taken into account. Screening and reflection by each individual of these obstacles are being considered</i>
Anmerkung: Die Beschreibungsgrößen 2, 3 und 4 in Tabelle 2 schließen einander nicht aus <i>Note: The intensities of description 2, 3 and 4 in Table 2 do not exclude each other</i>	

**Tabelle 20: Raumausstattung****Table 20: Room equipment**

## Beschreibung der Schallquellen

6. Maschinen, Werkzeuge oder geräuschintensive Arbeitsprozesse gelten als Schallquellen. Die Schallemission kann durch die folgenden Parameter beschrieben werden:
- Schalldruckpegel, A-bewertet oder in Oktav- oder Terzbändern
  - Emissionsschalleistungspegel am Arbeitsplatz, A-bewertet, in Oktav- oder Terzbändern
  - Entwicklung der Emissionen im Zeitablauf, Maximalwert, usw.
  - Richtcharakteristik oder Schalldruckpegelverteilung in einem Messbereich
  - Verteilung der Schallquellen auf der Oberfläche der Maschine
  - Abmessungen der Schallquelle

## Description of sound sources

6. Machinery, tools or noise-intensive work processes are regarded as sound sources. The sound emission can be defined by the following parameters:
- sound pressure level, A-weighted or in octave or third-octave bands
  - emission sound power level at the workplace, A-weighted, in octave or third-octave bands
  - development of emissions over time, maximum value, etc.
  - direction characteristic or sound pressure level distribution on a measuring area
  - distribution of sound sources on the body of the machinery
  - dimensions of sound source

Grad der Beschreibung <i>Degree of description</i>	Beschreibung der Schallquelle <i>Description of sound source</i>
1	Rundumstrahlende Punktquelle <i>Omni-directional point source</i>
2	Punktquelle mit Richtcharakteristik <i>Point source with a direction characteristic</i>
3	Komplexe Schallquellen <i>Complex sound sources</i>

**Tabelle 21: Schallquellen****Table 21: Sound sources****Schritt 3: Wahl der Vorausberechnungsmethode****Step 3: Selection of the pre-calculation method**

Kategorie <i>Category</i>	Vorausberechnungsmethode <i>Pre-calculation method</i>	
1	Diffusfeld <i>Diffuse field</i>	
2 a	geometrisch <i>geometrically</i>	Räume, die näherungsweise durch die durchschnittliche Absorption pro Wand und durch eine Durchschnittsdichte der Ausstattungsgegenstände beschrieben werden können <i>Rooms that can be described approximately through an average absorption per wall and through an average density of the equipment items</i>
2 b	geometrisch <i>geometrically</i>	Räume, die näherungsweise durch die durchschnittliche Absorption pro raumbegrenzender Oberfläche und durch eine Durchschnittsdichte der Ausstattungsgegenstände in jedem Teilbereich des Raumes beschrieben werden können <i>Rooms that can be described approximately through the average absorption per room limiting surface and through an average density of equipment items in each partial area of the room</i>
2 c	geometrisch <i>geometrically</i>	Räume, wo die jeweilige Verteilung von Absorptionsgraden und von Ausstattungsgegenständen berücksichtigt werden muss <i>Rooms where the respective distribution of degrees of absorption and of equipment items must be taken into account</i>

**Tabelle 22: Kategorien der Vorausberechnungsmethoden****Table 22: Categories of pre-calculation methods**

Kategorie der Vorausberechnungsmethode (siehe Tabelle 22) <i>Category of pre-calculation method</i> (see Table 22)	Beschreibungsgrad der Eingangsparameter <i>Degree of description of initial parameters</i>		
	Absorption und Geometrie des Raumes (siehe Tabelle 19) <i>Absorption and geometry of the room</i> (see Table 19)	Raumausstattung (siehe Tabelle 20) <i>Room equipment</i> (see Table 20)	Beschreibung der Schallquelle (siehe Tabelle 21) <i>Description of the sound source</i> (see Table 21)
1	1	1	1 bis / to 3
2 a	1; 2	1; 2	1 bis / to 3
2 b	1 bis / to 3	1 bis / to 3	1 bis / to 3
2 c	1 bis / to 4	1 bis / to 4	1 bis / to 3

**Tabelle 23: Empfohlene Bereiche der Eingangsparameter für jede Kategorie der Vorausberechnungsmethode**

**Table 23: Recommended areas of initial parameters for each category of pre-calculation methods**

Die vorstehenden Tabellen geben Anleitung für Raumsituationen, die benötigten bzw. vernünftigen Berechnungsmethoden und die benötigten, damit verbundenen Beschreibungsgrößen der Eingangsparameter.

The tables above render guidance for room situations, required, respectively sensible calculation methods and the associated required intensities of the description of the initial parameters.

Einfache Berechnungen gemäß Kategorie 1 – Diffusfeld – können mit der Methode, wie in A5-2.4 beschrieben, ausgeführt werden. Bereits die geometrische Methode der Kategorie 2 a (VDI 3760) ist relativ kompliziert und kann schwerlich ohne Computer und geeignete Software ausgeführt werden.

Simple calculations of category 1 – diffuse field – can be executed with the method described in A5-2.4. Already the geometric method of category 2 a (VDI 3760) is relatively complicated and can hardly be executed without computer and associated software.

Die geometrischen Methoden 2 b und 2 c sind weder standardisiert noch steht eine geeignete Software zur Verfügung. Diese Methoden werden von Spezialisten einzeln ausgeführt und stellen eine beträchtliche Anstrengung dar.

The geometrical methods 2b and 2 c are neither standardised nor is an associated software available. These methods are used by experts individually and constitute a considerable effort.

#### Schritt 4: Vorausberechnung

Mit den oben erwähnten Eingangsdaten und der im Schritt 4 gewählten Methode ist eine angemessene Berechnung durchzuführen. Eine abschließende Prüfung bezüglich des Grades der Zielerreichung, der im Schritt 1 definiert wurde, kann zu einer Wiederholung der Prozedur oder zu einer Bewertung des Ergebnisses mit Schlussfolgerungen (Schritt 5) führen.

#### Step 4: Pre-calculation

With the initial data mentioned above and the method chosen in step 4, the appropriate calculation shall be executed. A final test regarding the fulfilment of the targets defined in step 1 may lead to a repetition of the procedure or to an evaluation of the result with conclusions (step 5).

#### Schritt 5: Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Abgesehen von der Neuplanung von Arbeitsbereichen und Gebäudebedingungen dient die oben beschriebene Methode dem Entwurf und der Bemessung von Schallschutzmaßnahmen. Um dies zu erreichen, sind die Empfehlungen im Dokument A3 und im Kapitel A6-3 und die zitierte Literatur zu berücksichtigen.

#### Step 5: Results and conclusions

Apart from the re-design of work areas and building conditions, the method described above serves the design and the dimensioning of sound-protective measures. To achieve this, the recommendations in document A3 and chapter A6-3 and in the literature quoted shall be followed.

### A5-3.5 Sitzungsräume

### A5-3.5 Meeting rooms

#### A5-3.5.1 Allgemeines

#### A5-3.5.1 General

Ein Sitzungsraum ist ein abgeschlossener Raum, der für die Unterhaltung zwischen mehreren Personen geeignet ist. In den meisten Fällen sitzen die Personen um einen Tisch. Der Hauptzweck dieses Entwurfs ist es, dass die Benutzer für eine relativ lange Zeit in annehmbarer Bequemlichkeit reden und zuhören können.

A meeting room is a closed space which allows for the conversation between several persons. In most cases, individuals are sitting around a table. The main purpose of this design is that occupants may talk or listen in acceptable comfort for a relatively long time.

Man muss zwischen Sitzungs- und Konferenzräumen unterscheiden. Ein Konferenzraum kann für mehrere Hundert Personen vorgesehen sein, normalerweise in Sitzreihen angeordnet, die vor einer Plattform für den Sprecher stehen. Leinwände können benutzt werden oder auch andere generell audiovisuelle Hilfsmittel. Die Leinwand muss von allen Plätzen aus zu sehen sein, was entscheidende Anforderungen an die Raumabmessungen stellt. Bezüglich seiner akustischen Qualität: diese entspricht denen eines Mehrzweckraumes, wie im Kapitel A5-3.9 behandelt.

One must discern between meeting rooms and conference rooms. A conference room may be foreseen for several hundred people, generally distributed on seat ranges situated in front of a platform on which speakers appear. Screens can be produced or more general audio-visual productions. The screen must be visible from all places, which is a decisive requirement for the room dimensions. As for its acoustic qualities, these are similar to those of a multi-purpose room, treated in chapter A5-3.9.

Ein Sitzungsraum kann als ein sehr geräuschvoller Raum angesehen werden, besonders im Falle lebhafter Diskussionen oder im Falle von audiovisuellen Vorführungen. Aus diesem Grund müssen die ruhigen angrenzenden Räume geschützt werden und eine erhöhte akustische Dämmung zwischen dem Sitzungsraum und den angrenzenden Räumen ist vorzusehen.

A meeting room can be considered as a very noisy room, especially in case of an animated discussion or in case of audio-visual demonstrations. This is why the quiet adjacent room must be protected and a reinforced acoustic insulation between the meeting room and the adjacent rooms must be foreseen.

### A5-3.5.2 Anforderungen und Empfehlungen

Es wird zwischen kleinen Sitzungsräumen, in denen höchstens 12 Personen zusammenkommen, und großen Sitzungsräumen für bis zu 50 Personen unterschieden.

Für kleine Räume gibt es kein besonderes Problem, so lange die Nachhallzeit gleich oder unter 0,6 s und der Gesamtschallpegel nicht über 35 dB(A) liegt. Unter diesen Bedingungen ist die Sprachverständlichkeit normalerweise an allen Positionen gut und kann sogar ausgezeichnet sein.

Für große Sitzungsräume, möbliert, aber leer, muss die durchschnittliche Nachhallzeit in den Oktavbändern mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz kleiner sein als  $0,1 \cdot (V)^{1/3}$ , wobei V das Rauminvolumen in  $m^3$  ist. Ferner muss überprüft werden, dass die Sprachverständlichkeit, wenn Personen mit normaler Lautstärke reden, an jeder Position des Raumes gut ist (RASTI gleich oder über 60 %), wenn der Hintergrundgeräuschpegel relativ hoch ist, nahe 45 dB(A). Dieser Hintergrundgeräuschpegel wird durch dauernd arbeitende haustechnische Anlagen erzeugt (Ventilation, Klimaanlage), aber auch die von den Anwesenden ausgehenden Geräusche. Diese sind in den seltensten Fällen diszipliniert genug, um dem Sprecher in perfekter Stille zuzuhören. Es gibt stets Einzelgespräche mit mehr oder weniger abgesenkter Stimme, was zur Zunahme des Hintergrundgeräusches beiträgt.

### A5-3.5.3 Berechnungen

#### A5-3.5.3.1 Nachhallzeit

Die Berechnung der Nachhallzeit, unter Benutzung der Sabine-Formel, reicht sowohl für kleine als auch für große Sitzungsräume aus. Die Berechnungsmethode entspricht derjenigen, die in A5-3.2.3.1 für Klassenräume benutzt wurde.

Unabhängig vom Absorptionskoeffizienten des Bodens, der Decke oder der Wandflächen, die in den Leistungstabellen der Herstellerliteratur angegeben sind, ist es notwendig, die Schallabsorption durch Tische und Stühle zu berücksichtigen. Die Tabellen 24 und 25 enthalten mehrere Werte für verschiedene Sorten von Stühlen.

Im Falle einer durch das Auditorium besetzten Fläche muss der Absorptionskoeffizient dieser besetzten Fläche als Charakteristik mit herangezogen werden. Im Falle einfacher Sitze ist die äquivalente Absorptionsfläche der Sitze der maßgebliche Wert.

Art der Möbel <i>Kind of furniture</i>	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Holzsitze <i>Wooden seats</i>	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15
Stoffbezogene Sitze <i>Cloth-covered seats</i>	0,35	0,45	0,50	0,50	0,50	0,50
Gepolsterte Sitze <i>Stuffed seats</i>	0,45	0,55	0,65	0,70	0,75	0,70
Tisch <i>Table</i> (1,2 · 0,6 m)	0,20	0,30	0,25	0,20	0,20	0,25
Auditorium (pm) <i>Audience (pm)</i>	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,85

**Tabelle 24: Absorptionskoeffizienten für eine von Möbeln eingenommene Fläche**

### A5-3.5.2 Requirements and recommendations

We will distinguish between small meeting rooms, where a maximum of 12 persons may convene, and big meeting rooms which can accommodate up to 50 persons.

For small rooms, there is no specific problem as long as the reverberation time is equal or below 0,6 s and the overall sound level not above 35 dB(A). In this case, intelligibility of speech is generally good in all positions and can be excellent.

For big meeting rooms, furnished, but not occupied, the average reverberation time in octave bands centred on 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz must be lower than  $0,1 \cdot (V)^{1/3}$ , where V is the room volume in  $m^3$ . Additionally, it must be verified that the intelligibility of speech, when people talk at normal voice level, is good at every position (RASTI equal or over 60%), when the background noise level is relatively high, near 45 dB(A). This background noise level is caused by noises produced by continuously working building equipment (ventilation, air-conditioning), but also caused by noises produced by the occupants. These are rarely disciplined enough to listen to the speaker in perfect silence. There is always individual talk with a more or less lowered voice that contributes to the increase of the background noise level.

### A5-3.5.3 Calculations

#### A5-3.5.3.1 Reverberation time

The calculation of reverberation time, using the Sabine formula, is sufficient for both small as well as big meeting rooms. The calculation method is similar to that used in A5-3.2.3.1 for classrooms.

Independent of the absorbing coefficients of floor, ceiling or wall surfaces, which are listed in the performance tables in the manufacturers' literature, it is necessary to take into account the sound absorption by tables and chairs. The Tables 24 and 25 give several values for different kinds of chairs.

In case of a surface occupied by the audience, the characteristic to be taken into account is the absorption coefficient of this occupied surface. In case of simple seats, the basic characteristic is the equivalent absorption area of the seats.

**Table 24: Absorption coefficient for a surface occupied by furniture**

Art der Möbel <i>Kind of furniture</i>	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Holzsitze <i>Wooden seats</i>	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05
Stoffbezogene Sitze <i>Cloth-covered seats</i>	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25
Gepolsterte Sitze <i>Stuffed seats</i>	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,35
Tisch <i>Table</i> (1,2 · 0,6 m)	0,15	0,20	0,20	0,15	0,15	0,20

**Tabelle 25: Äquivalente Absorptionsfläche für ein Möbelstück ( $m^2_{Sab}$ )**

Für das Absorptionsverhalten unterschiedlicher Elemente siehe Anhang 1. Bezüglich des Absorptionsverhaltens verschiedener Materialien und Systeme siehe Herstellerangaben und Dokument A3.

#### A5-3.5.3.2 Sprachverständlichkeit

In einem Sitzungsraum ist es wichtig, dass an allen Plätzen gute Sprachverständlichkeit herrscht. Wenn die Verständlichkeit nur mittelmäßig ist, muss man sich beim Zuhören besonders anstrengen, was zu der häufig langen Konferenzdauer nicht passt. Ein RASTI-Index von größer oder gleich 60 % gilt als Zeichen guter Verständlichkeit. Je schmaler und länglicher der Raum ist, umso wichtiger ist die Beachtung der Sprachverständlichkeit an vom Sprecher weit entfernten Plätzen. Unten sind zwei Beispiele für Räume angegeben, in denen ungefähr 40 Personen um ovale Tische sitzen und miteinander kommunizieren müssen. Für beide Beispiele wurde die gleiche Behandlung der Wand zugrunde gelegt.

Raum 1: 12 m Länge, 9 m Breite und 3 m Höhe

Eine der langen Wände ist verglast und mit einem leichten Netzvorhang ausgerüstet. Die anderen Trennwände sind leicht und mit Mineralwolle hinter perforierten Holzplatten verkleidet. Für diese Untersuchung ist die Decke mit weichem Material bedeckt oder einer abgehängten Decke mit hohem Absorptionskoeffizienten verkleidet und der Boden ist mit Teppichboden oder einem hölzernen Parkett ausgerüstet. Da die Länge des Raumes wichtig ist (mehr als 10 m), müssen diese langen Wände mit absorbierendem Material verkleidet werden, um reine Echos zu vermeiden.

Der Hintergrundgeräuschpegel ist nahe 45 dB(A) (siehe Kapitel A5-3.5.2).

In Tabelle 26 ist die Entwicklung der durchschnittlichen Nachhallzeit in den Oktavbändern 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz in einem besetzten Raum und die Entwicklung der Sprachverständlichkeit im Verhältnis zur Flächenbehandlung gezeigt. Nur die Boden- und Deckenbeläge unterscheiden sich. Die Position der Schallquelle ist im Bild 18 mit „A“ angezeigt.

**Table 25: Equivalent absorption area for one piece of furniture ( $m^2_{Sab}$ )**

For the absorption performance of different elements see Annex 1. For the absorption performance of different materials and systems see manufacturers' documentation and document A3.

#### A5-3.5.3.2 Intelligibility of speech

In a meeting room it is important that good intelligibility of speech prevails at all positions. If the intelligibility is only moderate, it is necessary to make a special listening effort which is incompatible with the meetings' frequently occurring long duration. A RASTI index of over or equal 60% is considered a sign of a good intelligibility. The more the room is narrow and long, the more it is necessary to consider the intelligibility of speech at places far from the speaker. Below, two examples will be given for rooms where about 40 persons sit around an O-shaped table and need to communicate. The same wall treatment was considered for both examples.

Room 1: 12 m length, 9 m width and 3 m height

One of the long walls is glazed and equipped with a light net curtain. The other partitions are light and covered with perforated wood plates in front of mineral wool. In case of this study, the ceiling is covered with soft tissue or by a suspended ceiling with a high absorption coefficient and the floor is covered by wall-to-wall carpets or by a wooden parquet. As the length of the room is important (over 10 m), it is important to cover these long walls with absorbing materials to avoid pure echoes.

The background noise level is near 45 dB(A) (see chapter A5-3.5.2).

In Table 26, the development of the average reverberation time is shown in the octave bands 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz in an occupied room and the development of the intelligibility of speech in relation to the kind of treatment. Only floor and ceiling coverings vary. The position of the sound source is indicated by "A" in Figure 18.

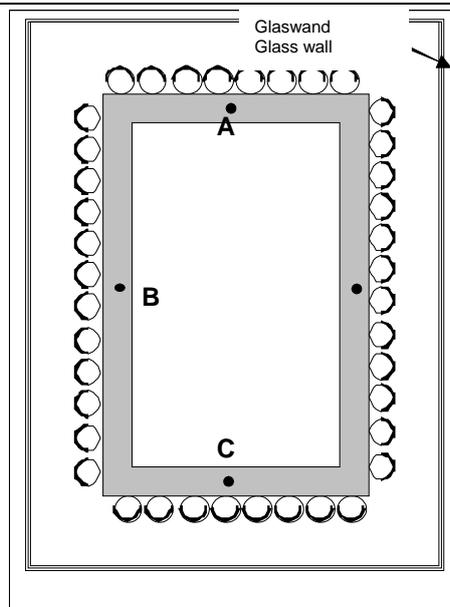


Bild 18: Grundriss des Sitzungsraumes 1

Figure 18: Plan of meeting room 1

Art der Behandlung <i>Kind of treatment</i>	Verständlichkeit für alle Hörer <i>Intelligibility for the whole audience (RASTI)</i>	Verständlichkeit bei B <i>Intelligibility at B</i>	Verständlichkeit bei C <i>Intelligibility at C</i>	Durchschnittliches T <i>Average T (s)</i>
Boden: Teppich Absorbierende Decke <i>Floor: carpet Absorbent ceiling</i>	50 bis / to 100 %	60 %	54 %	0,2
Boden: Parkett Absorbierende Decke <i>Floor: parquet Absorbent ceiling</i>	50 bis / to 100 %	62 %	55 %	0,25
Boden: Teppich Weiches Material an der Decke <i>Floor: carpet Smooth stuff on ceiling</i>	60 bis / to 98 %	67 %	62 %	0,3
Boden: Parkett Weiches Material an der Decke <i>Floor: parquet Smooth stuff on ceiling</i>	60 bis / to 99 %	67 %	63 %	0,4

Tabelle 26: Verständlichkeit und Nachhallzeit im Sitzungsraum 1

Table 26: Intelligibility and reverberation time in meeting room 1

Der graue Bereich in den Tabellen 26 und 27 zeigt Ergebnisse in Übereinstimmung mit einem oder mehreren Zielen. Die Ergebnisse zeigen, dass in diesem Sitzungsraum eine Reflexion der Schallenergie von der Decke erforderlich ist.

The grey area in Tables 26 and 27 shows results in accordance with one or more objectives. The results show that in this meeting room a reflection of acoustic energy from the ceiling is required.

Raum 2: 16 m Länge, 6 m Breite und 3 m Höhe

Die betrachteten Ausstattungen sind dieselben wie im Beispiel des Raumes 1.

In Anbetracht der Länge des Raumes muss zumindest eine der kurzen Wände zur Vermeidung von Echos behandelt werden. Da der Raum außerdem schmal ist, muss zumindest eine der beiden langen Wände ebenfalls behandelt werden, um Flatterechos zu vermeiden.

Tabelle 27 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Nachhallzeit in den Oktavbändern 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz und die Entwicklung der Sprachverständlichkeit in einem besetzten Raum, je nach der Art der Behandlung. Nur Boden- und Deckenbeläge unterscheiden sich. Die Position der Schallquelle ist in Bild 19 mit „A“ angezeigt.

Room 2: 16 m length, 6 m width and 3 m height

The treatments considered are the same as in the example of room 1.

Considering the length of the room, at least one of the short walls must be treated to avoid echoes. Since the room is also narrow, at least one of the two long walls must also be treated to avoid flutter echoes.

In Table 27, the development of the average reverberation time is shown in octave bands 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz and the development of the intelligibility of speech is shown in the occupied room, in relation with the kind of treatment. Only floor and ceiling surfaces vary. The position of the sound source is indicated with "A" in Figure 19.

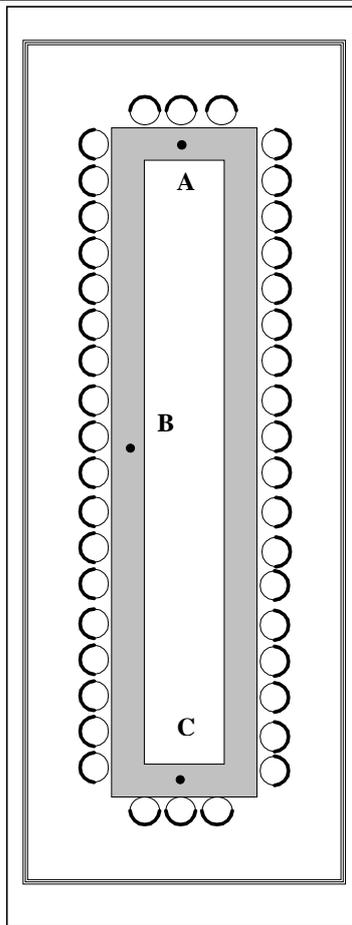


Bild 19: Sitzungsraum 2

Figure 19: Meeting room 2

Art der Behandlung <i>Kind of treatment</i>	Verständlichkeit für alle Hörer <i>Intelligibility for the whole audience (RASTI)</i>	Verständlichkeit bei B <i>Intelligibility at B</i>	Verständlichkeit bei C <i>Intelligibility at C</i>	Durchschnittliches T <i>Average T (s)</i>
Boden: Teppich Absorbierende Decke <i>Floor: carpet Absorbent ceiling</i>	45 bis / to 99 %	64 %	45 %	0,2
Boden: Parkett Absorbierende Decke <i>Floor: parquet Absorbent ceiling</i>	46 bis / to 99 %	64 %	47 %	0,2
Boden: Teppich Weiches Material an der Decke <i>Floor: carpet Smooth stuff on ceiling</i>	56 bis / to 87 %	70 %	57 %	0,3
Boden: Parkett Weiches Material an der Decke <i>Floor: parquet Smooth stuff on ceiling</i>	58 bis / to 96 %	70 %	59 %	0,35

Tabelle 27: Verständlichkeit und Nachhallzeit im Sitzungsraum 2

Table 27: Intelligibility and reverberation time in meeting room 2

Für diesen Raum ist die einzig akzeptable Ausstattung diejenige mit reflektierender Decke und Boden. Wenn der Sprecher gewohnt ist, in Sitzungsräumen zu sprechen, wird er bemerken, dass die Personen, die hinten sitzen, Schwierigkeiten haben, ihm zu folgen, und er wird seine Stimme anheben und andere Sprecher auffordern, dasselbe zu tun. Eine andere Lösung wäre die Benutzung von Mikrofonen und Lautsprechern.

For this room, the only just acceptable configuration is the one with reflective floor and ceiling. If the speaker is used to talk in meeting rooms, he will realise that persons sitting in the back of the room have difficulties to follow his talk and he will raise his voice and ask other speakers to do the same. Another solution is the use of microphones and loudspeakers.

Wegen der Nähe der Seitenwände ist die Sprachverständlichkeit in diesem schmalen Raum nur in der Nähe des Sprechers besser als im vorigen Beispiel. Andererseits ist die Sprachverständlichkeit für die vom Sprecher weit entfernten Positionen so gut wie im vorigen Beispiel.

Wenn dieser Sitzungsraum dadurch gebildet wurde, dass ein Großraumbüro unterteilt wurde, welches einen „Freiraum“ bildete, d. h. mit Teppichboden und einer hoch absorbierenden Decke ausgerüstet war, reicht die Errichtung von Zwischenwänden nicht aus. Zusätzlich müssen die Zwischenwände mit absorbierendem Material beschichtet werden und Boden und Decke müssen geändert werden.

### A5-3.6 Sporträume und Turnhallen

#### A5-3.6.1 Allgemeines

Die akustische Behandlung von Sporträumen, Turnhallen, Schwimmhallen, Eislaufhallen, usw. ist aus vier Gründen unerlässlich:

- Zur Vermeidung von Sicherheitsproblemen: In einem schalltechnisch nicht behandelten Bad könnte der Hintergrundgeräuschpegel, welcher sich aus dem Geschrei ergibt, Notsignale verdecken, die jemand abgibt, der in Schwierigkeiten ist.
- Verminderung des Hintergrundgeräusches, verursacht vom Betrieb, wo 80 dB(A) oder 90 dB(A) überschritten werden. Es ist zu beachten, dass dieser Schallpegel vom Personal den ganzen Tag ausgehalten werden muss und dass er nicht den für Arbeitsplätze geltenden Regeln genügt.
- Schaffung von Bedingungen, so dass die Anweisungen richtig verstanden werden und rasch befolgt werden können.
- Schaffung von Bedingungen, dass diese Sportstätten von Benutzern gerne besucht werden. Besucher werden nicht in Räume mit zu viel Nachhall gehen, diese werden daher kaum benutzt und das ist das Gegenteil von ihrem Zweck.

Unabhängig von ihrer Höhe sind Turnhallen ohne Besuchersitzreihen häufig parallelepipedische Räume. Wenn man sich mit der Behandlung der Decke zufrieden gibt, könnte das Ergebnis irreführend sein: Unabhängig von der mit der Sabine-Formel berechneten Länge der Nachhallzeit wird die gemessene Nachhallzeit höher sein (gelegentlich zweimal so lang). Dies beweist die Tatsache, dass ein Teil der Energie „im Raum kreist“, da er von den nicht absorbierenden senkrechten Wänden reflektiert wird, bevor er auf die absorbierende Fläche der Decke trifft. In diesen parallelepipedischen Räumen ist es demnach ebenfalls notwendig, die senkrechten Wände zu behandeln. In manchen Ländern gibt es die Vorschrift, dass sich mindestens 20 % der erforderlichen absorbierenden Fläche an den senkrechten Wänden befinden. In anderen Ländern ist es erforderlich, den Hallen eine so niedrige Nachhallzeit zu geben, dass dieser Wert unmöglich erreicht werden kann, wenn man nur die Decke behandelt.

Die akustische Behandlung von Sporträumen ist relativ schwierig, da sie einer Kombination verschiedenster Ansprüche genügen muss. In Sporthallen muss die absorbierende Behandlung stoßsicher sein, weswegen sie am liebsten an der Decke angebracht wird, insbesondere wenn die Halle sehr hoch ist. In Schwimmhallen muss die absorbierende Fläche feuchtigkeitsresistent sein, und da diese Materialien häufig porös und Wärme dämmend sind, müssen auch noch die Kondensationsprobleme gemeistert werden.

Um mechanischen Belastungen zu widerstehen, könnte man Mineralwolle benutzen, die durch ein Lochblech abgedeckt ist (wobei die Perforation 20 % oder höher sein muss – siehe Dokument A3-5.4.1). Um in dem absorbierenden Material Kondensationsprobleme durch den Wasserdampf in Schwimmhallen zu vermeiden, könnte man die Mineralwolle mit einer dünnen, aber dichten Plastikfolie umschließen.

Because of the proximity of the lateral walls, the intelligibility of speech in this narrow room is better than in the previous example only for the area near the speaker. On the other hand, for points far away from the speaker, the intelligibility of speech is not anywhere near as good as in the previous case.

If this meeting room has been derived from partitioning a large office hall, that used to represent an “open space”, i. e. fitted with wall-to-wall carpet and a very absorbing ceiling, the erection of partition walls is not sufficient. Additionally, it is necessary to cover the partitions with absorbing material and to modify the floor and the ceiling.

### A5-3.6 Sport rooms and gym halls

#### A5-3.6.1 General

The acoustical treatment of sport rooms, gym halls, swimming halls, ice-skating halls, etc. is indispensable because of four reasons:

- To avoid security problems: In an acoustically untreated bath, the level of ambient noise resulting from shouting could mask emergency signals by somebody who is in difficulties.
- Diminish the ambient noise caused by the activities where this exceeds 80 dB(A) or 90 dB(A). Take note that this is the acoustic level which is suffered by the personnel during the entire day and it is not in conformity with the regulations applying to working environments.
- Create conditions so that the instructions by the personnel can be correctly understood so that they can be followed effectively.
- Create conditions so that the users of these sport environments like to visit them. People will not go to too reverberant environments which are therefore little used, which is the opposite of their purpose.

Regardless of their height, gym halls without rows of seats for visitors are frequently parallel epipedic rooms. If one is content with treating the ceiling, the result could be misleading: Whichever the value of the reverberation time calculated with the Sabine formula, the measured reverberation time will be higher (occasionally twice the calculated value). This proves the fact that a part of the energy “circulates in the room”, because it is reflected from the vertical walls which are non-absorbent before it reaches the absorbent surface of the ceiling. In these parallel epipedic locations, it is necessary to also treat a part of the vertical walls. In certain countries, it is a requirement that at least 20% of the required absorbent areas should be placed on the walls. In other countries, it is required to give the place a reverberation time so diminished that it is impossible to reach that value with only absorbent areas on the ceiling.

The acoustic treatment of sport rooms is relatively difficult since it must answer a combination of numerous conditions. In sport halls, the absorbent treatment must be shock-resistant, which leads to the tendency to place it on the ceiling, especially if the hall is very high. In a swimming hall, the absorbent surfaces must resist moisture attack, and since these materials are frequently porous and thermally insulating, it is required to master the possibilities of condensation.

To withstand shocks, one could use mineral wool protected by perforated sheet metal (the perforation ratio being 20% or higher – see document A3.5.4.1). To avoid condensation problems in the water vapour in the absorbing material in swimming halls, one could enclose the mineral wool in a thin and tight plastic foil.

### A5-3.6.2 Anforderungen und Empfehlungen

Zurzeit gibt es nur Empfehlungen. Hierfür zwei Beispiele:

- In Dänemark sind die empfohlenen Nachhallzeiten verhältnismäßig schwach.
  - = Um für ihren Zweck tauglich zu sein, sollten Sport- und Turnhallen einen gewissen Anteil Schall absorbierender Flächen haben. In kleineren Hallen mit einem Gesamtvolumen von 3000 m<sup>3</sup> bis 4000 m<sup>3</sup> wird empfohlen, dass die Nachhallzeit in den Frequenzbändern zwischen 125 Hz und 4000 Hz 0,6 s nicht überschreiten sollte. In größeren Hallen sollte die äquivalente Absorptionsfläche  $\geq 0,9$ -mal der Bodenfläche sein.
  - = Aufgrund der verhältnismäßig großen Raumvolumen sollte die Nachhallzeit vorzugsweise als  $T_{Sab}$  gemäß Gleichung [2] im Kapitel A5-2.2.5 vorausberechnet werden.
  - = Bei größeren Räumen wird die äquivalente Absorptionsfläche  $A$  in Übereinstimmung mit der Definition gemäß Kapitel A5-2.2.5 berechnet.
  - = In größeren Sporthallen sollte auch der Komfort der Besucher eine Rolle spielen. Lautsprecheransagen dürfen nicht durch Reflexionen und Echos verzerrt werden. Andererseits zeigt die Erfahrung, dass reflektierende Wände hinter den Zuschauern und nicht zu weit von der Spielfläche entfernt den Sportlern eine dynamische Rückmeldung gegen und dadurch die gewünschte Spannungatmosphäre erzeugen.
- In Frankreich wird gerade eine zukünftige Regel entwickelt. Die Grenzen, insbesondere für Volumen, die unten angegeben werden, stehen noch in der Diskussion.
  - = Für Räume mit sportlichen Aktivitäten, in denen sich nicht ständig Zuschauer befinden, sollte die durchschnittliche Nachhallzeit in den Oktavbändern zwischen 125 Hz und 4000 Hz unterhalb eines Wertes  $T_{max}$  sein, der von dem Raumvolumen  $V$  abhängt:
 

$$\text{Für Raumvolumen über } 500 \text{ m}^3, T_{max} = 0,1 V^{1/3}$$

$$\text{Für Raumvolumen unter } 500 \text{ m}^3, T_{max} = 0,8 \text{ s.}$$
- Das benötigte Absorptionsmaterial sollte schließlich an der Decke und zumindest an einer der senkrechten Wände angebracht werden.

### A5-3.7 Große Räume / Öffentliche Räume

#### A5-3.7.1 Großraumbüros – Offene Räume

##### A5-3.7.1.1 Allgemeines

Ein großer Raum soll Platz für eine große Anzahl von Personen haben und trennt die einzelnen Arbeitsplätze nicht. In einem Großraumbüro können die Aktivitäten unterschiedlich sein: Telefonvermittlung (Callcenter, Verwaltung, Forschungsarbeiten).

Für diese Räume ist es von größter Wichtigkeit, Störeinflüsse zwischen Arbeitsplätzen zu begrenzen, unter gleichzeitiger Sicherstellung eines guten Koversationskomforts auf kurze Entfernungen.

##### A5-3.7.1.2 Anforderungen und Empfehlungen

Der Entwurf der französischen Norm, die wir für kleine Büros im Kapitel A5-3.2.2 zitiert haben, enthält Empfehlungen für drei Qualitätsebenen, von denen wir nur die letzten beiden betrachten. In der Tat sind große Räume / offene Räume ein Sonderfall, der große Sorgfalt in der Behandlung erfordert, um Klagen von Benutzern zu vermeiden.

- Sehr gute Ebene B: kurze Unterhaltungen mit gedämpfter Stimme sind keine Quelle für Störeinflüsse für andere Benutzer des Raumes.

### A5-3.6.2 Requirements and recommendations

Currently, we only have recommendations. We are giving two examples:

- In Denmark, the recommended reverberation times are relatively weak.
  - = In order to be suitable for application, sport and gym halls have a certain amount of sound-absorbing surfaces. In smaller halls with a total volume of 3000 m<sup>3</sup> to 4000 m<sup>3</sup>, it is recommended that the reverberation time in the frequency band between 125 Hz and 4000 Hz should not exceed 0,6 s. In larger halls, the so-called equivalent absorption area should be  $\geq 0,9$  times the floor area.
  - = Due to the rather big room volumes, reverberation time should preferably be predicted as  $T_{Sab}$  according to equation [2] in chapter A5.2-2.5
  - = For larger rooms, the equivalent absorption area  $A$  is calculated in accordance with the definition given in chapter A5-2.2.5.
  - = In larger sport halls, especially the spectators' comfort should be taken into consideration. Loudspeaker information must not be distorted by reflections and echoes. On the other hand, experiences show that reflecting walls behind the audience and not too far from the sport field will form a dynamic feedback to the athletes and thereby create a desirable hectic atmosphere.
- In France, a future regulation is being developed. The borders, especially the volumes we are giving below are still under discussion.
  - = For rooms with sportive activities, which are not permanently occupied by spectators, the duration of the average reverberation time in the octave bands between 125 Hz and 4000 Hz should be below a value  $T_{max}$  which is dependent upon the volume  $V$  of the room.
 

$$\text{For room volumes above } 500 \text{ m}^3, T_{max} = 0,1 V^{1/3}$$

$$\text{For room volumes below } 500 \text{ m}^3, T_{max} = 0,8 \text{ s.}$$
- The required absorbing materials should finally be placed on the ceiling and at least on one of the vertical walls.

### A5-3.7 Large-scale rooms / public spaces

#### A5-3.7.1 Large office halls – open spaces

##### A5-3.7.1.1 General

A large-scale room is designed to receive a great number of persons and it has no divisions between working places. In a large office hall, activities can be varied: call centre, administration, studies).

For this kind of rooms, the main objective is to achieve a limitation of the inconvenience between neighbouring working places, whilst simultaneously providing a good conversation comfort at short distances.

##### A5-3.7.1.2 Requirements and recommendations

The draft of the French standard quoted in chapter A5-3.2.2 for small offices gives recommendations for three quality levels of which we will consider only the last two. In fact, large-scale rooms / open spaces are a particular case which needs a careful treatment if user complaints are to be avoided.

- Outstanding level B: short conversations in a low voice are no source of inconvenience for other users of the room.

- Höchste Ebene C: es ist nicht erforderlich, für eine kurze Unterhaltung mit einem benachbarten Arbeitsplatz die Stimme zu erheben. Der Schutz vor Störungen zwischen entfernteren Arbeitsplätzen ist ziemlich gut.

- High performance level C: it is not necessary to raise the voice too much for a short conversation with the neighbouring working place. The privacy between more distant working places is quite good.

Für beide Qualitätsebenen sind Geräusche der haustechnischen Anlagen oder externe Geräusche wahrnehmbar, jedoch nicht störend oder ermüdend.

For both quality levels, noises from building equipment and external noise are perceptible, but do not cause inconvenience or fatigue.

In Tabelle 28 sind die akustischen Leistungen, die für die beiden Qualitätsebenen erforderlich sind, angegeben.

Table 28 gives the acoustic performances associated with the two quality levels.

Kriterium <i>Criteria</i>	Qualitätsebene B <i>Quality level B</i>	Qualitätsebene C <i>Quality level C</i>
Hintergrundgeräusch <i>Background noise</i>	40 < L <sub>50</sub> < 45 dB(A)	40 < L <sub>50</sub> < 45 dB(A)
Geräuschpegel Gebäudeanlagen <i>Equipment noise level</i>	≤ NR 40	zwischen NR 35 und NR 40 <i>between NR 35 and NR 40</i>
Nachhallzeit: V < 250 m <sup>3</sup> V > 250 m <sup>3</sup>	0,6 s < T < 0,8 s unerheblich	T ≤ 0,5 s unerheblich
Reverberation time: V < 250 m <sup>3</sup> V > 250 m <sup>3</sup>	0,6 s < T < 0,8 s <i>not significant</i>	T ≤ 0,5 s <i>not significant</i>
Mindestabstand der Arbeitsplätze voneinander <i>Minimum distance from a working place to another</i>	3 m	4 m + Detailuntersuchung der Gestal- tung erforderlich <i>4 m + compulsory study for arrange- ment</i>
Abnahme mit der Entfernung <i>Space decrease</i>	4 dB pro Entfernungsverdoppelung <i>4 dB per doubling of distance</i>	5 dB pro Entfernungsverdoppelung <i>5 dB per doubling of distance</i>
Privacy index (siehe / see A5- 3.7.1.3.2)	70% < PI < 80%	PI > 80%

**Tabelle 28: Empfehlungen für offene Räume**

**Table 28: Recommendations for open spaces**

#### A5-3.7.1.3 Berechnung

#### A5-3.7.1.3 Calculation

##### A5-3.7.1.3.1 Schallpegelabnahme bei Entfernungsverdop- pelung von der Quelle

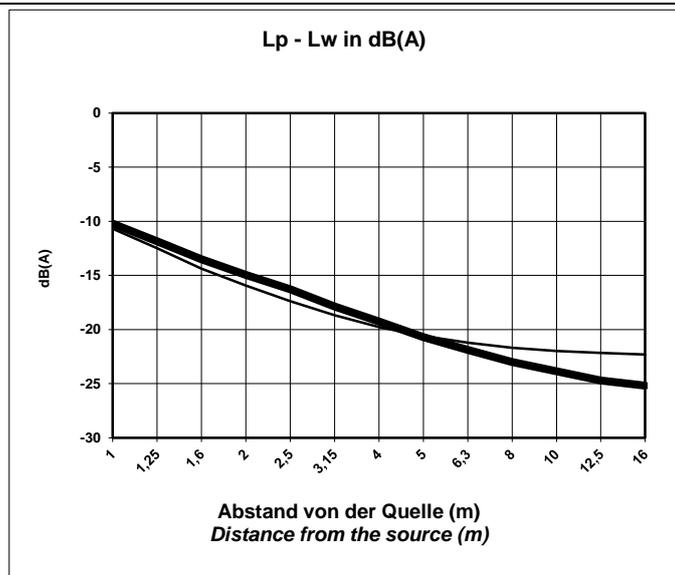
##### A5-3.7.1.3.1 Decrease of sound level by doubling the dis- tance from the source

Die Schallpegelabnahme pro Entfernungsverdoppelung von der Quelle kann nicht mit der klassischen Formel für direkte und Hallfelder berechnet werden:  $L_p = L_W + 10 \log(Q/4\pi r^2 + 4/R)$ , wobei R die Raumkonstante in m<sup>2</sup> ist, Q die Richtung der Quelle und r der Abstand in m zwischen Quelle und Ort des Hörers (siehe Kapitel A5-2.4.2).

The sound level decrease by doubling the distance from the source can not be calculated with the classical formula for direct and reverberant fields:  $L_p = L_W + 10 \log(Q/4\pi r^2 + 4/R)$ , where R is the constant of the room in m<sup>2</sup>, Q is the directivity of the source and r the distance in m from the hearing point to the source (see chapter A5-2.4.2).

Im Bild 20 zeigt die dicke Linie das Ergebnis eines offenen, nicht möblierten Raumes, Grundriss 25 · 25 m und 3 m Deckenhöhe, und die dünne Linie zeigt das erwartete Ergebnis bei Benutzung der oben angegebenen Gleichung. In diesem Beispiel hatten die senkrechten Wände reflektierende Oberflächen (eine Wand Leichttrennwand und drei Wände völlig aus Glas). Die Decke war sehr stark absorbierend und der Boden mit einer dicken Auslegware ausgelegt.

Figure 20 shows in bold line the result in an open space not furnished, 25 · 25 m for the floor and 3 m under the ceiling and in fine line the expected result when using the equation mentioned above. In this example, the vertical walls were reflective (one wall lightweight partition and three walls made totally of glass). The ceiling was very absorbent and the floor was fitted with a thick wall-to-wall carpet.



**Bild 20:** Beispiel für die Abnahme mit der Entfernung von der Schallquelle  
**Dicke Linie:** tatsächliche Abnahme  
**Dünne Linie:** Abnahme mit der Formel „direktes Feld und Hallfeld“ berechnet

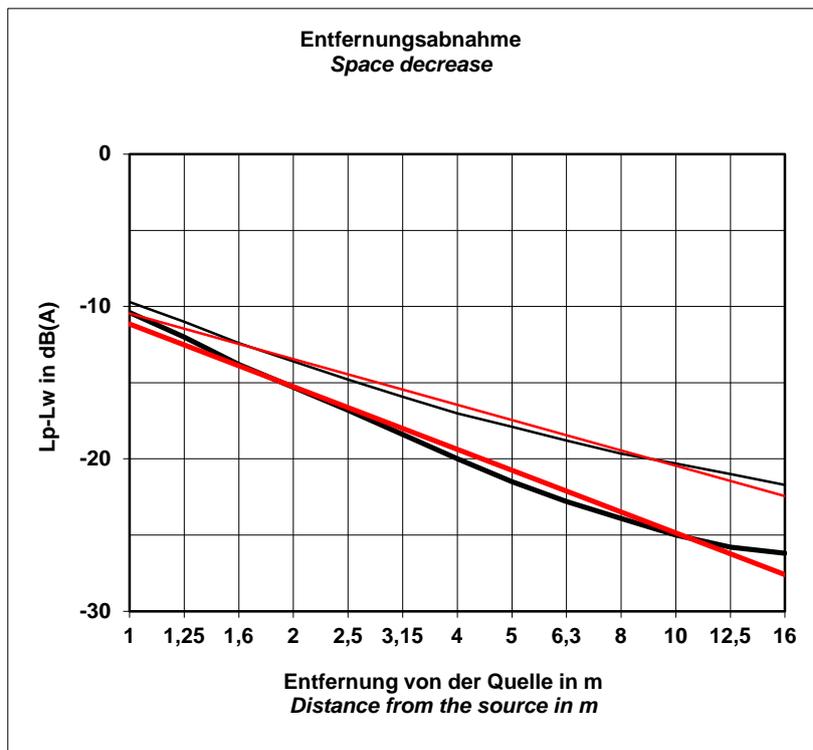
**Figure 20:** Example of decrease with distance from the sound source  
**Bold line:** real decrease  
**Fine line:** decrease as result of equation “direct field and reverberant field”

Tatsächlich ist dieser Raum flach, da die Deckenhöhe deutlich geringer ist als die beiden anderen Abmessungen. Die Kurve ist fast identisch mit den Kurven, die im Kapitel A5-2.4.3 vorgestellt wurden.

In fact, the room is flat, the height under the ceiling being notably smaller than the two other dimensions. The curve obtained is almost the same as the curves presented in chapter A5-2.4.3.

Um die vorausgesehene Pegelabnahme über die Entfernung zu berechnen, wird im Allgemeinen eine Software benutzt, die auf dem Strahlungssatz basiert. Die für das letzte Beispiel angenommene Situation zeigt, dass die Pegelabnahme mit der Entfernung hauptsächlich auf den Absorptionsqualitäten von Boden und Decke beruht. Bild 21 zeigt die Regressionslinien, die man erhält bei Teppichboden, der entweder mit einer sehr reflektierenden oder mit einer sehr absorbierenden Decke kombiniert ist.

To calculate the expected level decrease over distance, generally a software based on the rays principle is used. The simulated situation for the last example shows that the distance decrease of sound levels depends mainly on the absorption characteristics of the floor and the ceiling. Figure 21 shows the regression lines obtained with the floor covered by wall-to-wall carpet when combined either with a highly reflective or a very absorbent ceiling.



**Bild 21:** Regressionslinien, wenn die Decke sehr stark reflektiert (dünne Linien) und wenn sie stark absorbiert (dicke Linien)

**Figure 21:** Regression lines when the ceiling is quite reflective (fine lines) and when it is very absorbent (bold lines)

Wenn die Decke reflektiert (obere Kurven), beträgt die Abnahme 3 dB(A) pro Entfernungsverdoppelung.

When the ceiling is reflective (upper curves), the decrease is 3 dB(A) by doubling of the distance.

Wenn die Decke absorbiert, ist die Abnahme 4,1 dB(A).

When the ceiling is absorbent, the decrease becomes 4,1 dB(A).

Diese Entfernungsabnahmen wurden für eine Schallquelle mit Rosaruschen kalkuliert.

These distance decreases were calculated for an emission of pink noise.

Es ist sicher, dass wenn der offene Raum mit seinen Arbeitsplätzen ausgestattet ist und die trennenden Einheiten verschiedene Abschirmungen formen, die Pegelabnahme sich so erhöht, dass die Qualitätsebene C gemäß Tabelle 28 erreicht wird, d. h. 5 dB(A) pro Entfernungsverdoppelung von der Quelle.

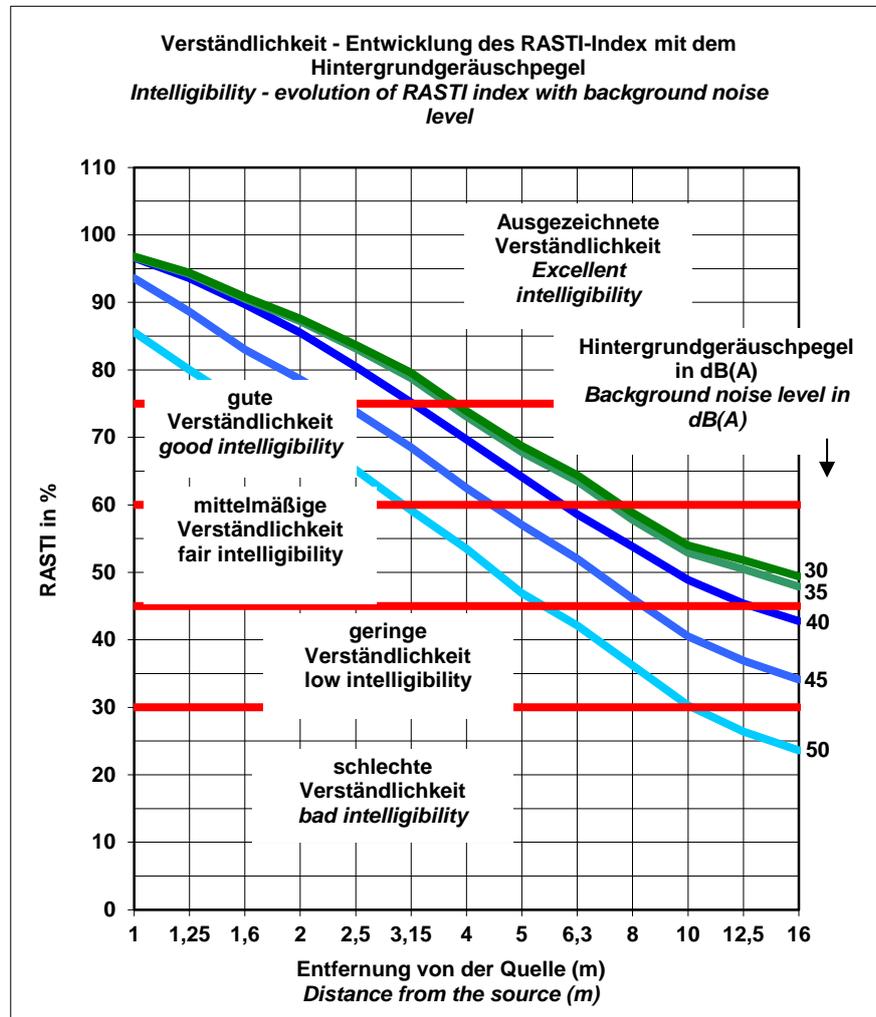
It is certain that when the open space is furnished with its workstations and several screens formed by the separating units, the level decrease will be increased to reach the quality level C of Table 28, that is 5 dB(A) per doubling of the distance from the source.

#### A5-3.7.1.3.2 Privacy Index

#### A5-3.7.1.3.2 Privacy Index

In offenen Räumen scheinen Verständlichkeitsindizes nicht die wichtigste Überlegung zu sein. Man benötigt eine gute Verständlichkeit in der Nähe des Sprechers und eine schlechte Verständlichkeit ein bisschen weiter weg. Bild 22 zeigt die Anforderung für einen offenen Raum an ein relativ hohes Hintergrundgeräusch. Es zeigt auch die Veränderung des RASTI-Index im Verhältnis zur Entfernung von der Quelle und den Gesamtschallpegel des Hintergrundgeräusches.

In case of open spaces, intelligibility indices do not seem to be the most important consideration. We need a good intelligibility near the speaker and a bad intelligibility a bit farther away. Figure 22 shows a requirement for an open space, to have a relatively high background noise level. It shows the variation of the RASTI index in relation to the distance from the source and the overall background noise level.



**Bild 22: Verständlichkeit im Verhältnis zur Entfernung von der Quelle und zum Hintergrundgeräuschpegel**

**Figure 22: Intelligibility in relation to the distance from the source and the background noise level**

Diese Indizes werden für Schallemissionen mit normalem Sprachpegel bestimmt. Tatsächlich neigt man in gut ausgestatteten großen Räumen dazu, weniger laut zu sprechen, wenn wir durch eine Person in der Nähe (Gesprächspartner) gut verstanden werden. Mit einem niedrig abgestrahlten Geräuschpegel wird die Entfernung, wo geringere Verständlichkeit beginnt, kürzer.

These indices are determined for a sound emission with normal voice level. In fact, in large halls well treated, the tendency is to speak less loudly when we are understood by a nearby person (interlocutor). With a lowly emitted noise level, the distance from where we would start to have a lower intelligibility would be shorter.

Bild 22 rechtfertigt die Anforderung von 4 m als Mindestabstand zwischen Arbeitsplätzen.

Der Privacy Index (PI) ist ein Maß für die speech privacy in einem Raum. Er ergibt sich aus dem Artikulationsindex AI (siehe Kapitel A5-2.3.2), wobei  $PI = (1 - AI) \cdot 100$  in %.

Es gibt vier Ebenen der speech privacy gemäß der ASTM E1374-Norm „Richtlinie für Großraumbüroakustik und Anwendung von ASTM-Standards“ (beachten Sie, dass, wie auch für den AI, dieser Parameter in den USA entwickelt wurde und in Europa nicht im allgemeinen Gebrauch ist).

1. Vertrauliche Privatheit: PI von 95 % oder besser. Sprache wird wahrgenommen, aber nicht verstanden.
2. Normale Privatheit: PI 85 – 95 %. Besondere Aufmerksamkeit ist erforderlich, um Sprache zu verstehen.
3. Vorübergehende Privatheit: PI 60 – 80 %. Sprache wird meist verstanden und kann ablenken.
4. Keine Privatheit: PI unter 69 %. Sprache wird klar verstanden.

#### A5-3.7.1.3.3 Spezielle Untersuchungen

Wenn in einem neuen Gebäude eine Bürohalle vorgesehen ist und die zukünftigen Benutzer nicht bekannt sind, ist es häufig erforderlich, den Raum zu behandeln als handle es sich um einen offenen Raum, auch wenn bekannt ist, dass einige Bereiche bestimmt abgeteilt werden. Es muss deswegen untersucht werden, welche Veränderungen nötig werden für den Fall, dass Bereiche abgeteilt werden.

Eines der zu lösenden Hauptprobleme ist die Verträglichkeit des oft durch Maschinen erzeugten Hintergrundgeräusches, welches in einem offenen Raum hinnehmbar ist und des Hintergrundgeräusches, welches in einem abgeteilten Büro hinnehmbar ist. Der Hintergrundgeräuschpegel muss oft von 45 dB(A) auf 35 dB(A) gemindert werden. Das Problem wird noch komplizierter, wenn man berücksichtigt, dass in Großraumbüros die meisten der Zuluft- und Abluftöffnungen häufig in der Mitte der Decke angebracht sind, weit entfernt von den senkrechten Wänden. Wenn solche großen Bereiche in mehrere Zellen unterteilt werden, sind einige dieser Öffnungen in der Nähe solcher neu errichteten Zwischenwände. Auf diese Weise ändert sich die Schallreflexion am Ende eines Belüftungsschachtes (Auslass) und ebenfalls die Richtcharakteristik Q dieser Quelle (siehe auch A4-6 und A4-2.3.5).

Es ist daher nötig, bereits am Anfang des Projekts die späteren Veränderungen an den „Gittern“ voranzuplanen, die nötig werden, wenn die große Halle in kleinere Zellen unterteilt wird: Änderung der Luftgeschwindigkeit, zusätzliche Schalldämpfer (für diese muss Raum vorgesehen werden), Veränderung der Position der Mündung, usw.

Ein anderes Problem ist die Verträglichkeit der akustischen Ausstattung einer großen Halle mit derjenigen eines abgeteilten Büros im Verhältnis zu seinem Verwendungszweck. Zum Beispiel muss die Decke einer großen Halle sehr absorbierend sein und im Gegensatz dazu muss die Decke eines großen Sitzungsraumes gut reflektieren (siehe oben).

#### A5-3.7.2 Restaurants

In diesem Kapitel werden großräumige Restaurants (> 250 m<sup>3</sup>) untersucht, wie z. B. Betriebs- oder Schulkantinen. Für kleinere Restaurants gilt das Kapitel über Gemeinschaftsbüros (A5-3.2.1).

Figure 22 justifies the requirement for a minimum distance between workplaces of 4 m.

The Privacy Index (PI) is a measure of speech privacy in a room. It is derived from the Articulation Index (AI) (see chapter A5-2.3.2), where  $PI = (1 - AI) \cdot 100$  in %.

There are four levels of speech privacy, according to the ASTM E1374 standard “Guide for open office acoustics and applicable ASTM standards” (note that, same as for AI, this parameter has been developed in the USA, but is not generally used in Europe).

1. Confidential privacy: PI of 95% or better. Speech can be detected, but not understood.
2. Normal privacy: PI 85 – 95%. Effort is required to understand speech.
3. Transitional privacy: PI 60 – 80%. Speech is mostly understood and can be distracting.
4. No privacy: PI less than 69%. Speech is clearly understood.

#### A5-3.7.1.3.3 Special studies

If an office hall is foreseen in a new building and the future occupants are not yet known, it is frequently required to treat the space as if it will be an open space, even if we know that some areas will definitely be partitioned off. It must therefore be investigated what modifications will need to be made in case the area is partitioned.

One of the main problems to solve is the compatibility of the background sound level, often caused by machinery, that is acceptable in an open space, and the background noise level acceptable in a closed office. The background noise level must frequently be diminished from 45 dB(A) to 35 dB(A). This problem becomes even more intricate as we realise that in large office halls most of the air insertion and extraction nozzles are frequently in the centre part of the ceiling, far away from vertical walls. When such large areas are partitioned into several compartments, some of these nozzles will be near these newly erected partition walls. Thus, noise reflection at the end of the ventilation duct (outlet) and the directivity Q of these sources will change (see also A4-6 and A6-2.3.5).

So it is necessary to pre-plan in the initial project the modifications required at the “grids” in case of partitioning the large hall into smaller cubicles: change of the air speed, complementary silencers (we must have room to introduce those), modification of the nozzle position, etc.

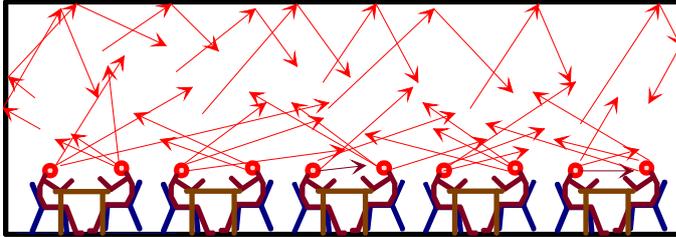
Another problem is the compatibility the acoustic treatment of a large hall with that of a partitioned office in relation to its purpose. For example, the ceiling of a large hall must be very absorbent and on the contrary, the ceiling of a large meeting room has to be reflective (see above).

#### A5-3.7.2 Restaurants

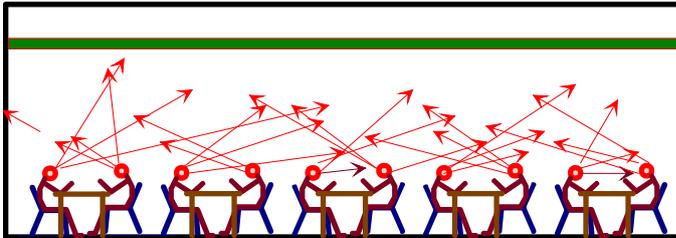
In this chapter, big-volume restaurants (> 250 m<sup>3</sup>) will be examined, such as company or school canteens. For smaller restaurants, see the chapter on collective offices (A5-3.2.1).

## A5-3.7.2.1 Allgemeines

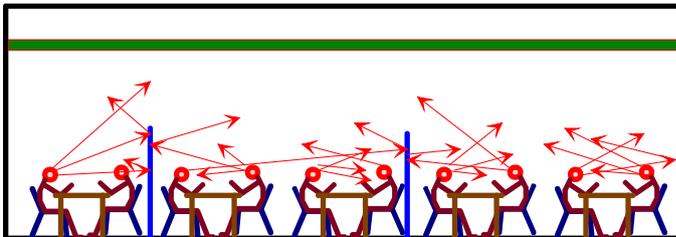
## A5-3.7.2.1 General



Schalltechnisch unbehandeltes Restaurant  
*Untreated restaurant*



Restaurant mit absorbierender Decke  
*Restaurant with absorbing ceiling*



Restaurant mit absorbierender Decke und reflektierenden Schirmen  
*Restaurant with absorbing ceiling and with reflective screens*

**Bild 23: Prinzipien für Restaurantbehandlungen**

**Figure 23: Principles for restaurants' treatment**

Man könnte annehmen, dass die akustische Behandlung, die für große Restaurants erforderlich ist, derjenigen für große Büros entspricht: Konversation um einen Tisch muss leicht sein und für Personen, die an Nebentischen sitzen, nur schwer zu verstehen.

One could assume that the acoustic treatment needed for large restaurants was the same as the one needed for a large office: Conversation around a table must be easy, and audible for people sitting at tables in the neighbourhood only with difficulty.

Es gibt dort jedoch einige grundsätzliche Unterschiede. Die Tische, wie auch Arbeitsplätze, stehen näher beieinander. Außerdem findet dort nicht nur gelegentliche Konversation statt, sondern ganz im Gegenteil, alle Menschen oder fast alle reden gleichzeitig. Das führt zu einer Erhöhung des Gesamthintergrundgeräuschpegels. Auf diese Weise entsteht, was wir den „Cocktail effekt“ nennen: Der Hintergrundgeräuschpegel ist hoch, was zu einer Tendenz lauterem Sprechen führt, damit man das Hintergrundgeräusch überdeckt und vom Gesprächspartner verstanden wird. Aber dann machen alle Sprecher dasselbe, wodurch sie zur Erhöhung des Hintergrundgeräusches beitragen. Schließlich ist das Hintergrundgeräusch so hoch, dass es unmöglich ist, seine eigene Stimme noch mehr anzuheben, um den Hintergrundgeräuschpegel zu überdecken. Wenn es unmöglich ist, dem Gesprächspartner zuzuhören oder zu ihm zu sprechen, hören wir mit Reden auf. Der Hintergrundgeräuschpegel sinkt ab. Wir können wieder anfangen zu sprechen, usw., usw.

However, there are some principal differences. The tables, like workstations, are nearer to one another. There is not only occasional conversation, but on the contrary, all people, or almost all, talk at the same time. This contributes to an elevation of the overall background noise level. Thus, we obtain what we call the “cocktail effect”. The background noise level is high, which leads to the tendency of speaking more loudly to cover the background noise and to be understood by one's communication partner. But then, every talking person does the same, thereby contributing to just another increase of the background noise level. Suddenly, this noise level is so high that it is impossible to raise one's own voice any more to cover the background noise level. Being unable to listen or talk to our communication partner, we stop talking. The background noise level decreases. We may speak up again, etc., etc.

Im Restaurant sind die Schallquellen über die ganze Fläche verteilt. Es ist wichtig, die abgestrahlte Schallenergie so nahe wie möglich an der Quelle zu absorbieren. Es wird daher empfohlen, eine sehr gut absorbierende Decke relativ niedrig anzubringen. Aber selbst dort, wo dies verwirklicht wurde, ist der Hintergrundgeräuschpegel hoch, weil viele Menschen gleichzeitig reden.

In a restaurant, the noise sources are distributed throughout the surface. It is important to absorb the emitted acoustic energy as close as possible to the source. So it is recommended to install a very absorbent ceiling, combined with a relatively low height under the ceiling. But even were this type of treatment is realised, the background noise level will be elevated as many persons talk at the same time.

Beispiel: Betriebskantine von 20 m Länge, 15 m Breite und 3,5 m Höhe, in der 150 Personen sitzen können. Wenn die Decke sehr absorbierend ist und der Boden sehr reflektierend (häufig werden Fliesen aus Gründen einfacher Reinigung bevorzugt), kann die äquivalente Absorptionsfläche bis zu 350 m<sup>2</sup> groß sein. Wenn 75 Personen mit normaler Lautstärke reden, ist der Geräuschpegel im Hallfeld nahe 70 dB(A). Bei solchem Pegel müssen die Personen bereits die Stimme anheben, um verstanden zu werden.

Eine Lösung besteht darin, die Absorption mit absorbierendem Material an den Wänden zu verbessern und die Ergänzung der akustischen Behandlung des Raumes durch zusätzliche Restaurantarrangements: Mit reflektierenden Schirmen, die die Fläche unterteilen, wird die direkte Übertragung von einem Tisch zum anderen vermindert und die Reflexion vom Schirm hebt den nutzbaren Geräuschpegel für den jeweiligen Gesprächspartner. Man kann sich gedämpft unterhalten und dennoch von den Personen um den eigenen Tisch verstanden werden.

Die Schirme mit vielen Löchern, die man häufig in Restaurant sieht, haben nur einen dekorativen Zweck und keinerlei akustische Wirkung.

#### **A5-3.7.2.2 Anforderungen und Empfehlungen**

Der Gesamtgeräuschpegel durch haustechnische Anlagen und Außengeräusche kann in einem möblierten, aber nicht besetzten Restaurant zwischen 40 dB(A) und 45 dB(A) betragen.

Eine brauchbare durchschnittliche Nachhallzeit in den Oktavbändern mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz ist unter 0,6 s.

Die Entfernungsabnahme muss etwa 4 dB oder 5 dB pro Entfernungsverdoppelung betragen.

### **A5-3.8 Große Auditorien / Konzertsäle / Opernhäuser**

#### **A5-3.8.1 Allgemeines**

Nachhallzeit ist das wichtigste Merkmal beim Entwurf von Musikräumen. Bei der Planung müssen jedoch auch viele andere akustische Parameter in Betracht gezogen werden, um die ausgezeichneten akustischen Bedingungen zu erreichen, die für Konzert- und Opernhallen benötigt werden. Ein Teil dieser Parameter ist ziemlich subjektiv und Ansichtssache. Mit anderen Worten, der Entwurf von Weltklasse-Musikhallen ist eine Besonderheit jenseits des Rahmens dieses Dokuments.

Die beste Nachhallzeit für Musikräume ist abhängig von der Art der Musik, die vorgeführt wird. Es ist z. B. gut bekannt, dass Kirchenmusik längere Nachhallzeiten erfordert als sinfonische Musik. Dies ist aus dem nachstehenden Bild abzulesen, welches auch zeigt, dass die bevorzugte Nachhallzeit mit der Raumgröße zunimmt.

Example: Company restaurant with 20 m length, 15 m width and 3,5 m height in which 150 persons can sit. If the ceiling is very absorbent and the floor covering is reflective (often tiled floors are preferred for the reasons of easy cleaning), the equivalent absorption area can be as big as 350 m<sup>2</sup>. If 75 persons talk at the same time with a normal voice, the noise level in the reverberated field is near 70 dB(A). With such a level, people are obliged to raise the voice level to be heard.

A solution consists in increasing absorption by absorbing materials on the walls and in the completion of the acoustic room treatment by a complementary restaurant arrangement: With reflective screens placed to separate areas, the direct transmission from one table to others is diminished, and the reflection from the screen raises the useful noise level for the respective communication partner. So one can talk lowly and nevertheless be understood by the people around ones table.

The screens frequently seen in restaurants with many holes are only a decorative element and are without any acoustic effect.

#### **A5-3.7.2.2 Requirements and recommendations**

The overall noise level caused by building equipment and external noise can be between 40 dB(A) and 45 dB(A) in a restaurant furnished, but not occupied.

The suitable reverberation time in octave bands centred on 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz is under 0,6 s.

The distance decrease must be about 4 dB or 5 dB per doubling of the distance.

### **A5-3.8 Large auditoria / concert halls / operas**

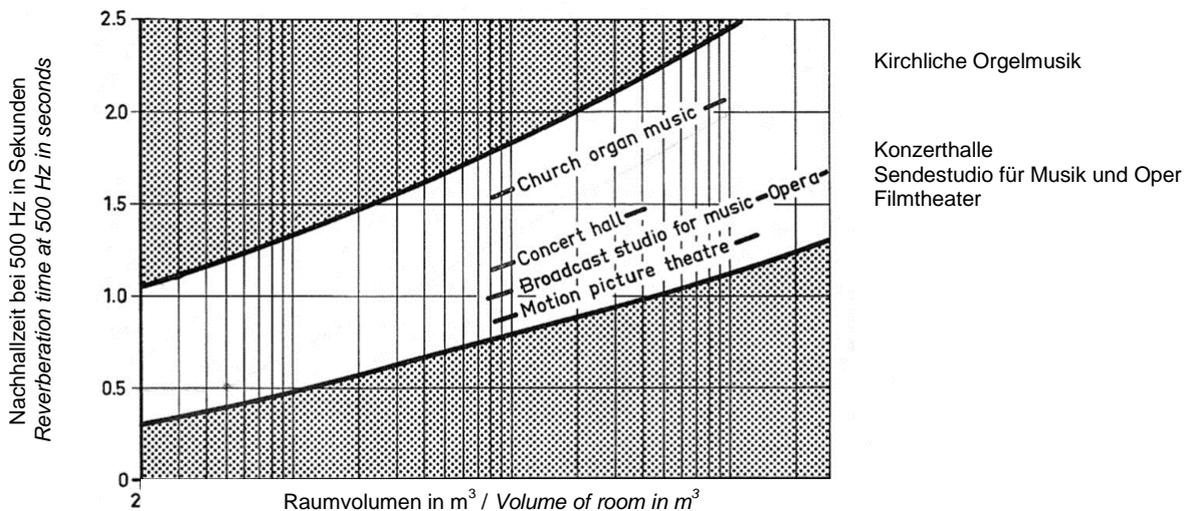
#### **A5-3.8.1 General**

Reverberation time is the prime parameter for designing music rooms. but also many other acoustic parameters must be taken into consideration in the design to achieve the excellent acoustic conditions needed for concert and opera halls. Part of those parameters is rather subjective and a matter of opinion. In other words, the design of world-class music halls is a speciality beyond the frame of this document.

The optimum reverberation time of music halls varies with the kind of music to be performed. It is e. g. well known that church music demands longer reverberation than symphonic music. This is qualified in the figure below, which also indicates that the preferable reverberation time generally improves with the room volume.

## A5-3.8.2 Anforderungen und Empfehlungen

## A5-3.8.2 Requirements and recommendations



**Bild 24:** „Optimale“ Nachhallzeiten für verschieden große Musikräume. Die gezeigten Kurven sind Kompromisse zwischen den Empfehlungen verschiedener Autoren (Per V. Brüel: Architectural Acoustics, Brüel & Kjaer, Kopenhagen)

**Figure 24:** “Optimum” reverberation times for various sizes of music rooms. The curves shown are compromises between the recommendations of a number of authors (Per V Brüel: Architectural Acoustics, Brüel & Kjaer, Copenhagen)

Die besten Werte für die Nachhallzeit in den Mittenfrequenzen liegen zwischen 1,4 und 2,8 s mit einer frühen Abklingzeit (EDT) zwischen 1,8 s und 2,6 s.

The optimum values for the reverberation time in mid-frequencies are between 1,4 s and 2,8 s, with an Early Decay Time (EDT) between 1,8 s and 2,6 s.

Bevorzugte Situation von:  $EDT_{aud} > T$  (durchschnittlich),  
 $EDT_{aud} / EDT_{podium} < 1$

Advantaged situation of  $EDT_{aud} > T$  (averaged),  
 $EDT_{aud} / EDT_{podium} < 1$

Optimale Werte  $C_{80} = \pm 2$  dB,  
 $LEF = 0,2 - 0,3$

Optimum values  $C_{80} = \pm 2$  dB,  
 $LEF = 0,2 - 0,3$

## A5-3.9 Mehrzweckräume

## A5-3.9 Multi-purpose rooms

## A5-3.9.1 Allgemeines

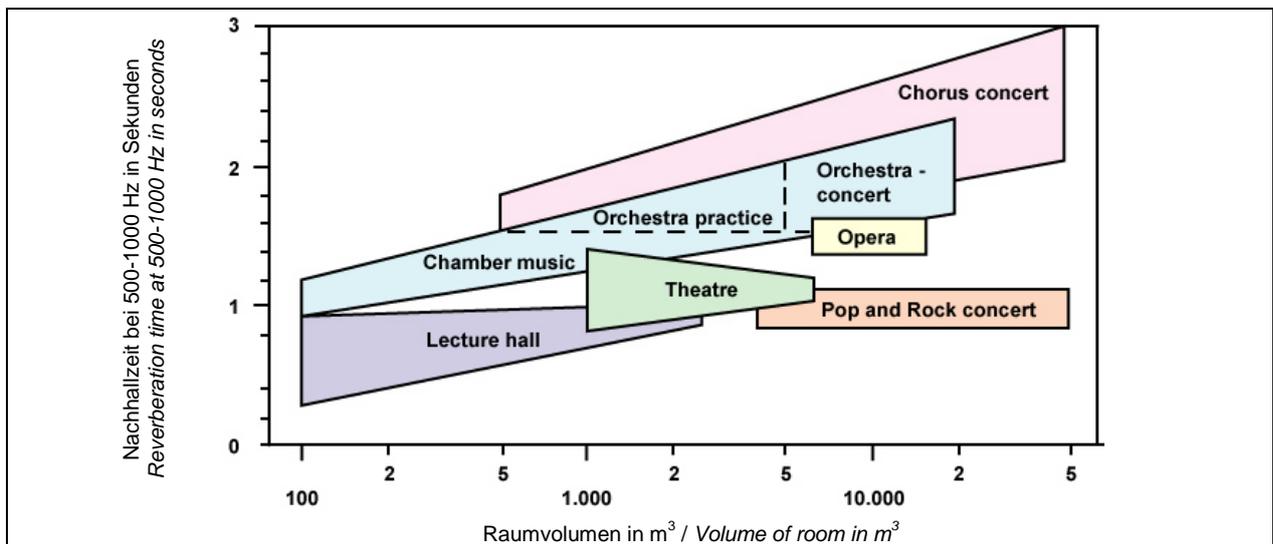
## A5-3.9.1 General

Die unterschiedlichen optimalen Nachhallzeiten maßgeschneidert, um einer bestimmten Nutzung einer Halle zu entsprechen, bedeutet unglücklicherweise, dass es unmöglich ist, die Nachhallzeit für eine Halle zu optimieren, die verschiedenen Arten von Kulturveranstaltungen dienen soll.

The varying optimum reverberation times tailored to suit the use of a given hall means unfortunately that it is not possible to optimise the reverberation time of a hall intended for various kinds of cultural activities.

Das nachstehende Bild, welches die Nachhallzeiten bei 500 Hz und 1000 Hz gegenüber verschiedenen Raumgrößen zeigt, beruht auf praktischer Erfahrung. Wenn sich die Nachhallzeit außerhalb des für einen bestimmten Zweck angegebenen Bereichs befindet, wird die Raumakustik möglicherweise für unbefriedigend erachtet.

The following figure, showing a reverberation time at 500 Hz and 1000 Hz versus room volume, is based on practical experience. If the reverberation time is outside the sketched areas for a given purpose, the acoustics of the room will probably be regarded acoustically unsatisfactory.



**Bild 25: Orchesterprobe, Orchesterkonzert, Chorkonzert, Pop- und Rockkonzert, Theater, Kammermusik, Hörsaal** (J. H. Rindel, Technical University Copenhagen)

**Figure 25: Orchestra practice, orchestra concert, chorus concert, pop and rock concert, theatre, chamber music, lecture hall** (J. H. Rindel, Technical University Copenhagen)

Es gibt nicht viele Überlappungen der für verschiedene Zwecke markierten Bereiche und bei größeren Volumina; man findet sogar Lücken. Was das Bild zeigt: Eine befriedigende Akustik sowohl für Oper als auch für Theater in demselben Raum ist nicht erreichbar.

It is not much overlap between the areas for different use and at larger volumes, one even finds gaps. As illustrated in the figure, satisfactory acoustics for both opera and theatre are incompatible in the same hall.

Nichtsdestotrotz, basierend auf dem Wunsch, eine Halle zu erhalten, die für eine Reihe kultureller Zwecke anwendbar wäre, sind die verschiedensten Hallen gebaut worden. Im schlimmsten Fall kann das Bestreben, eine Mehrzweckhalle zu erhalten, zu einem Raum führen, der für keinen Zweck richtig tauglich ist.

Nevertheless, based on the wish to get a hall applicable for a number of cultural purposes, various halls have been built. In the worst case, the desire to get a multi-purpose hall may lead to a room not really suitable for any purpose.

Um dieses Problem zu überwinden, müssen so genannte „veränderbare akustische Bedingungen“ eingeführt werden, was bedeutet, dass die akustischen Eigenschaften, insbesondere die Nachhallzeit, an das tatsächliche Ereignis angepasst werden kann.

To overcome this problem, so-called “variable acoustics” must be installed, which means that the acoustic properties, especially the reverberation time, are adjustable according to the actual event.

Im Prinzip ist es sehr einfach, Absorptionsflächen zu beseitigen oder hinzuzufügen. Zahlreiche, mehr oder weniger intelligente mechanische Systeme sind entworfen worden, um „veränderliche akustische Bedingungen“ zu erreichen. Vorherrschende Lösungen sind:

In principle, it is very simple to remove or add absorption areas. Numerous, more or less sophisticated mechanical systems have been designed in order to achieve “variable acoustics”. Predominant solutions are:

- Nachhallzeiten können verlängert werden durch Abdeckung absorbierender Flächen mit harten Platten. Die praktische Lösung verbindet Jalousien und Platten, die gefaltet oder hochgezogen oder beiseite geschoben werden können. Entsprechend könnten absorbierende Elemente mechanisch oder manuell beseitigt werden.
- Nachhallzeiten könnten durch Absorber aus Gewebe verkürzt werden, indem man schwere Vorhänge, je nach der Frequenz, die absorbiert werden soll, in einem Abstand von 25 mm bis 200 mm vor einer Wand anbringt. Eine andere Möglichkeit sind Behänge aus Stoff, die auf und ab gerollt werden. Waagrecht angebrachte gerollte Stoffe für Decken sind ebenfalls in Gebrauch.

- Reverberation time may be prolonged by covering absorbent areas with hard surfaced plates. The practical solutions comprise Venetian blinds and plates to be folded or to be hoisted or pushed away. Similarly, the absorbing panels could be removed, manually or mechanically.
- Reverberation times could be diminished by the use of fabric absorbers in the shape of drawing curtains of heavy fabric, depending on frequencies to be absorbed at a distance of 25 mm to 200 mm from the hard wall. Other possibilities are hangings of fabric, mounted to be rolled up and down. Horizontally installed rolled fabric covers for ceilings are also in use.

#### A5-3.9.2 Anforderungen und Empfehlungen

Pop- und Rockmusik sollte in Hallen mit sehr geringem Raumhall gespielt werden, da der Nachhall Teil der Musik ist. Er wird durch die benutzten elektronischen Verstärker erzeugt und der Raumhall würde sich nur mit dem Direktschall aus den Lautsprechern überlagern und damit die Qualität der Musik mindern.

#### A5-3.9.2 Requirements and recommendations

Pop and rock music should be played in halls with very low room reverberation, because reverberation is part of the music. It is created by the electronic equipment used and room reverberation would only interfere with the direct sound from the loudspeakers and thereby lower the quality of the music.

Elektronischer Nachhall kann auch in Sinfoniehallen benutzt werden. Bereits in den späten 60er Jahren wurde ein elektronisches System „Unterstützung der Resonanz“ mit Erfolg in der Royal Festival Hall in London eingebaut. Dieses System bietet die größten Vorteile bei tiefen Frequenzen. Einige Jahre später wurde das „mehrkanalige Nachhall“-System erfunden. Dieses System ist besonders für mittlere und hohe Frequenzen geeignet. Eine technische Grenze ist, dass die elektroakustisch erzeugte Verlängerung der Nachhallzeit nicht mehr als 50 % betragen sollte. Beide Systeme machen die musikalische Empfindung durch das Auditorium unabhängig von den Nachhallcharakteristiken der benutzten Musikhalle.

Einige Menschen sind gegen diese Art von künstlichem Klang. Nichtsdestotrotz, wenn sie gut geplant sind, können diese Systeme den möglichen Nutzungsbereich von Mehrzweckhallen erweitern. Es gibt verschiedene erfolgreiche Beispiele.

Vor mehreren Jahren hat S.N.I., die französische Isoliererorganisation, Empfehlungen für Mehrzweckhallen veröffentlicht. Die grundlegende Idee ist, dass für eine bestimmte Tätigkeit in der Halle die bestmögliche Nachhallzeit vom Volumen des Raumes abhängt. Oft jedoch wünscht jeder Spezialist für ein bestimmtes Volumen und eine bestimmte Produktion eine andere Nachhallzeit als jeder andere. Auf diese Weise wird für Produktionen ohne die Hilfe elektronischer Systeme der Bereich, der den Empfehlungen vieler Autoren für Vortragszwecke entspricht, teilweise von dem Bereich für Kammermusik überlagert. Wenn man empfehlen würde, eine Nachhallzeit in der Mitte beider Bereiche anzustreben, hätten wir mit hoher Wahrscheinlichkeit einen brauchbaren Mehrzweckraum. Dies bedeutet in der Tat, dass Nachhallzeit kombiniert mit einer geringen Schwankung des Nachhalls in den Frequenzen auch für Produktionen mit elektroakustischen Systemen interessant sind. Wenn man jedoch die Möglichkeiten einer solchen Halle zu Sinfoniemusik hin erweitern will, muss man die Möglichkeiten variabler akustischer Bedingungen untersuchen. Die S.N.I.-Empfehlungen können, wie in der folgenden Tabelle gezeigt, zusammengefasst werden.

Volumen (m <sup>3</sup> ) <i>Volume (m<sup>3</sup>)</i>	500	1000	2000	4000	8000	10000
$T_0$ in s in den Mittenfrequenzen (500 und 1000 Hz) im besetzten Raum <i><math>T_0</math> in s in the mid-frequencies (500 and 1000 Hz) in the occupied room</i>	0,85	0,95	1,05	1,1	1,2	1,3
$T_0$ in s für Mittenfrequenzen im unbesetzten Raum <i><math>T_0</math> in s for mid-frequencies in an unoccupied room</i>	1	1,15	1,3	1,35	1,5	2

$T_0$  = optimale Nachhallzeit in den Mittenfrequenzen in s  
 *$T_0$  = optimum reverberation time in the mid-frequencies in s*

**Tabelle 29: S.N.I.-Empfehlungen für Mehrzweckhallen**

Im tiefen Frequenzbereich kann die Nachhallzeit  $1,2 \cdot T_0$  bis  $1,3 \cdot T_0$  betragen, im hohen Frequenzbereich  $0,9 \cdot T_0$ .

### A5-3.10 Fernseh- / Musikaufnahmestudios

#### A5-3.10.1 Allgemeines

Um mit dem theoretischen Ansatz dieses Themas zu beginnen, ist es erforderlich, den Unterschied zwischen großen Aufnahmestudios und kleinen Studios festzulegen. Der Oktavbereich des hörbaren Spektrums ist so groß, dass eine akustische Analyse kleiner Räume sich von derjenigen großer Räume stark unterscheidet. Unterhalb von 300 Hz muss ein durchschnittliches Studio oder ein durchschnittlicher Hörraum als ein Resonanzhohlraum betrachtet werden. Es ist nicht das Studio, was schwingt, es ist die im Studio eingeschlossene Luft. Wenn die Frequenz über 300 Hz zunimmt, wird die Wellenlänge kürzer und kürzer mit dem Ergebnis, dass der Schall als Strahlen und Spiegelreflexionen betrachtet werden kann.

Electronic reverberation can also be used in symphonic music halls. Already in the late sixties, an electronic system "assisted resonance" has successfully been installed in the Royal Festival Hall in London. This system has its greatest advantages at low frequencies. A few years later, the "multi-channel reverberation" system was invented. This system is especially suitable at medium and high frequencies. One technical limitation is that the electro-acoustical increase in reverberation time should not exceed 50%. Both these systems make the perception of the music by the audience independent of the reverberation characteristics of the music hall.

Some people are against that kind of artificial sound. Nevertheless, properly designed, these systems can broaden the range of utility of multi-purpose halls. Several successful examples exist.

Several years ago, S.N.I., the French contractors' organisation for insulation, gave recommendations for multi-purpose halls. The basic idea was that for one activity in the hall, the optimum reverberation time depends on the volume of the room. But for one determined volume, and for one production, each specialist wants a reverberation time often different than the value wanted by another specialist. Thus, for productions without the help of electronic systems, the area corresponding to the recommendations by many authors for a speech production recovered partially the area for the chamber music. If we recommended to obtain a reverberation time in the middle of both areas, we would have a good possibility to obtain an acceptable multi-purpose room. Indeed, this means reverberation time combined with a low variation of the reverberation with the frequency is also interesting for the productions with electro-acoustic systems. However, if we want to complete the activity of such a hall by the production of symphonic music, we must study a possibility of variable acoustics. The S.N.I. recommendations can be summarised by the following table.

**Table 29: S.N.I. recommendations for multi-purpose halls**

In the low frequencies, the reverberation time can be  $1,2 \cdot T_0$  to  $1,3 \cdot T_0$ , in high frequencies it can be  $0,9 \cdot T_0$ .

### A5-3.10 Television / music recording studios

#### A5-3.10.1 General

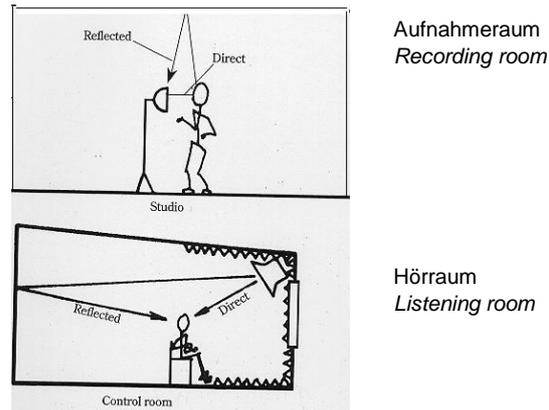
To begin the theoretical approach to this subject, it is necessary to establish the difference between a large recording studio and a small studio. The octave spread of the audible spectrum is so great that the acoustical analysis of small rooms is quite different from that of large rooms. Below of 300 Hz, the average studio or listening room must be considered as a resonant cavity. It is not the studio that resonates, it is the air confined within the studio. As frequency increases above 300 Hz, the wavelength becomes smaller and smaller with the result that sound may be considered as rays and specular reflections.

Heutzutage erfordern die meisten Studios Bereiche für sehr gutes Hören und sehr gute Aufnahmemöglichkeiten zu niedrigen Kosten. Ferner gibt es eine Reihe von kleinen Aufnahmestudios, die nur begrenzte Budgets und begrenzte technische Möglichkeiten haben. Dieses Kapitel dient in erster Linie diesen Studios. Es stimmt, dass auch in diesem Fall eine gute Kenntnis und Praxis in akustischen Fragen nötig ist, um einen guten Raum zu entwerfen und dieses Kapitel enthält nur einige Informationen zu dem Thema. Außerdem variieren die Theorien und die Kriterien für Studioentwürfe.

Der kombinierte Studio- / Hörraum sollte akustische Bedingungen aufweisen, die für beide Zwecke taugen, wie im nächsten Bild dargestellt, auch wenn das den tatsächlichen Anforderungen nicht immer entspricht.

Nowadays, most of the studios require spaces designed for quality listening and quality recording at low cost. In addition, there are a lot of small recording studios which have limited budgets and limited technical resources. This chapter is aimed primarily at those studios. It is true that even in this case, a deep knowledge and practice of acoustics is necessary to design a good studio, and this chapter only contains some information regarding this subject. Moreover, the theories and criteria for studio design vary.

The combined studio / listening room should have acoustics suitable for both listening and recording purposes, according to the following figure, even if this is not always the real situation.



**Bild 26: Reflexionen in Studios**

**Figure 26: Reflections in studios**

Dieselben größeren akustischen Probleme betreffen den Entwurf kleiner Räume: Hörräume, Audioarbeitsräume, Kontrollräume und Studios.

The same major acoustical problems are involved in the design of small rooms: listening rooms, audio workrooms, control rooms and studios.

Professionelle Studios sind in Hör- und Kontrollräume getrennt.

Professional studios are divided into listening and control rooms.

Nachstehend werden einige Informationen zu allgemeinen Hörräumen vorgestellt. Danach einige Informationen für kleine Aufnahmestudios und Kontrollräume.

In the following, we will present some information regarding general listening rooms. After that, some information for small recording studios and control rooms is given.

Weitere Informationen zu diesem Kapitel können dem Literaturverzeichnis sowie den Normen und technischen Dokumenten entnommen werden, die bei EBU (European Broadcasting Union) verfügbar sind.

Information related to this chapter can be obtained from the bibliography and from the standards and technical documents available in the EBU (European Broadcasting Union).

#### **A5-3.10.2 Zuhörbereich in einem professionellen Arbeitsraum**

#### **A5-3.10.2 Listening area in a professional workroom**

Dieses Kapitel betrifft Räume innerhalb von Studios oder akustischen Arbeitsräumen, die dem Musikhören dienen. Jedoch ist diese Information auch für Aufnahmeräume zu gebrauchen.

This chapter deals with rooms inside a studio or acoustical workroom that are used to listen to music. However, this information is also valid for recording rooms.

Die Raumgröße ist ein wichtiger Parameter. In diesem Zusammenhang ist es von Interesse, einige nützliche Ergebnisse praktischer Erfahrungen zu kennen:

The size of the room is an important parameter. Then, it is interesting to know some useful results of practical experience:

Studios mit Volumen von weniger als ca. 40 m<sup>3</sup> sind so empfindlich gegen Klangverzerrung, dass sie unpraktisch sind. In derartig kleinen Räumen ist es möglich, dass man hörbare Verzerrungen erhält.

Studios with volumes of less than about 40 m<sup>3</sup> are so prone to sound coloration that they are impractical. In rooms that small, it is possible to have audible distortions.

Für bestimmte Verhältnisse von Raumabmessungen gibt die nachstehende Tabelle einige Empfehlungen von verschiedenen Autoren vor.

For certain ratios of room dimensions, the next table shows the different recommendations given by different authors.

Autor <i>Author</i>	Höhe <i>Height</i>	Breite <i>Width</i>	Länge <i>Length</i>
Sepmeyer	1	1,28	1,54
	1	1,6	2,33
Louden	1	1,4	1,9
	1	1,5	2,5
Volkmann	1	1,5	2,5
Boner	1	1,26	1,59

**Tabelle 30: Verschiedene Empfehlungen für Studioabmessungen**

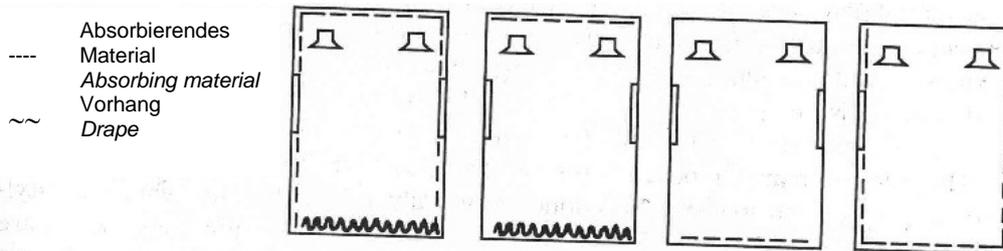
Diese Tabelle gibt die Raumproportionen an, die die beste Verteilung der Raummoden (siehe Kapitel A5-2.4.6) abgibt. Bei neuen Konstruktionen können diese Proportionen als Anhalt benutzt werden, wobei jedwede Abmessung durch Nachrechnen und genaue Beachtung des Raumbedarfs für axiale Moden (Literatur zu diesem Thema heranziehen) anzupassen ist.

Es sind einige Experimente durchgeführt worden, um die Raumausrüstung zu ermitteln, die am besten zur Bewertung von Hörprodukten unter dem Gesichtspunkt des „Stereoindrucks“ geeignet ist. Das nächste Bild zeigt eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse. Es ist bemerkenswert, dass keine einzelne Anordnung dabei ist, die für alle fünf Kriterien gute Ergebnisse zeigt (die Räume hatten Holzparkettböden und absorbierende Decken).

**Table 30: Several recommendations for the studios' dimensions**

This table lists the room proportions yielding the most favourable distribution of the room's modes (see chapter A5-2.4.6). With new constructions, these proportions can be used as a guide, conforming any dimensions by calculation and close study of the spacing of axial-modes frequencies (refer to literature for this subject).

Some experiments were conducted for the purpose of finding the room's treatment best suited for evaluating audio products, under the "stereo image" point of view. The following figure shows the summary of the results. It is significant that no single arrangement was found that gave good results for all five criteria (the rooms had parquet wood floors and absorbent ceilings).



Ortsempfindung <i>Localisation</i>	gut <i>good</i>	schwach <i>poor</i>	schwach <i>poor</i>	mittelmäßig <i>fair</i>
Klangtreue <i>Non-coloration</i>	gut <i>good</i>	schwach <i>poor</i>	schwach <i>poor</i>	mittelmäßig <i>fair</i>
Lautstärke <i>Loudness</i>	schwach <i>poor</i>	gut <i>good</i>	gut <i>good</i>	gut <i>good</i>
Stereoindruck <i>Broadening of image</i>	schwach <i>poor</i>	gut <i>good</i>	gut <i>good</i>	mittelmäßig <i>fair</i>
Perspektive <i>Perspective</i>	gut <i>good</i>	gut <i>good</i>	schwach <i>poor</i>	gut <i>good</i>

**Bild 27: Erfüllung verschiedener Kriterien bei unterschiedlichen Ausstattungen**

Bezüglich der Raumantwort in Abhängigkeit von den Frequenzen sind nachstehend einige Angaben gegeben.

**a) Tiefe Frequenzen (< 300 Hz)**

Die Lautsprecher erregen die modalen Resonanzen jeweils an ihrem Ort. Die Moden, die am Ort des Lautsprechers Null aufweisen, können nicht erregt werden (entsprechend einer Gitarrensaite: Null liegt dort, wo der Finger auf der Saite ist, hier ist keine Anregung möglich). Lautsprecher sollten so weit wie möglich von der reflektierenden Fläche entfernt aufgestellt werden.

Es ist nicht möglich, jede Mode akustisch unterschiedlich zu behandeln; es ist erforderlich, einen generellen Umgang mit tiefen Frequenzen zu finden. Es ist nützlich, Tieffrequenzabsorber in den zwei Raumecken nahe der Lautsprecher anzuordnen. Diese Absorber können Helmholtz-Resonatoren sein, „Bassfallen“ oder Diffusoren (es gibt handelsübliche Lösungen), wie im nächsten Bild gezeigt.

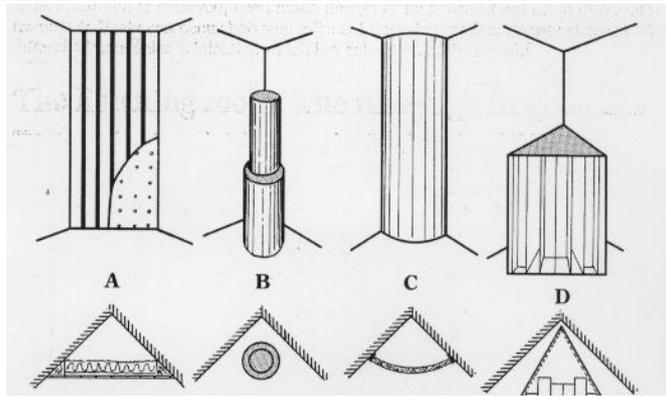
**Figure 27: Answer to different criteria in relation with kind of treatment**

Regarding the room response depending upon frequencies, some practical indications are given below:

**a) Low frequencies (< 300 Hz)**

The loudspeakers energise the modal resonances prevailing at their locations, and the modes that have zeros at a loudspeaker location cannot be energised (similar to a string in a guitar: zero where the finger is on the string, at this point no excitation is possible). Loudspeakers should be located as far away from reflecting surfaces as practicable.

It is not practical to acoustically treat each mode separately; it is necessary to find a general low-frequency treatment. It is useful to place low-frequency absorbers in the two corners of the room near the loudspeakers. These absorbers can be Helmholtz resonators, "bass traps" or diffusers (there are commercial solutions), as shown in the next figure.



**Bild 28: Beispiele für Tieffrequenzabsorber**

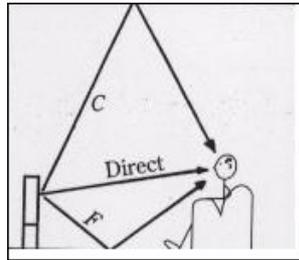
**Figure 28: Examples of low-frequency absorbers**

b) Mittlere bis hohe Frequenzen

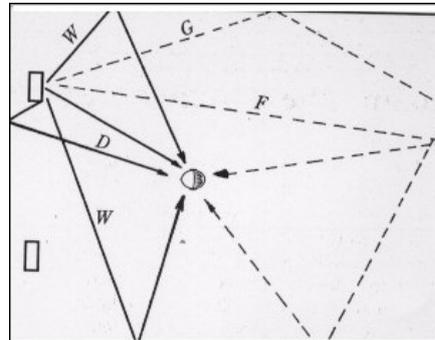
Für diese Frequenzen gilt die Strahlentheorie mit Spiegelreflexionen. Das erste Signal, was beim Hörer ankommt, ist der direkte Schall, die Reflexionen kommen später an. Diese Reflexionen sind frühe Reflexionen. Die Reflexionen des allgemeinen Nachhalls kommen viel später an. Die nachfolgende Skizze zeigt den direkten Schall und die indirekten Reflexionen (von Decke, Boden und Seitenwänden).

b) Mid to high frequencies

For these frequencies, the ray theory with specular (mirror) reflection is available. The first signal to reach the listener is the direct sound, and the reflections arrive later. These reflections are early reflections. The reflections from general reverberation arrive much later. The following scheme shows the direct sound and indirect reflections (of ceiling, floor and lateral walls).



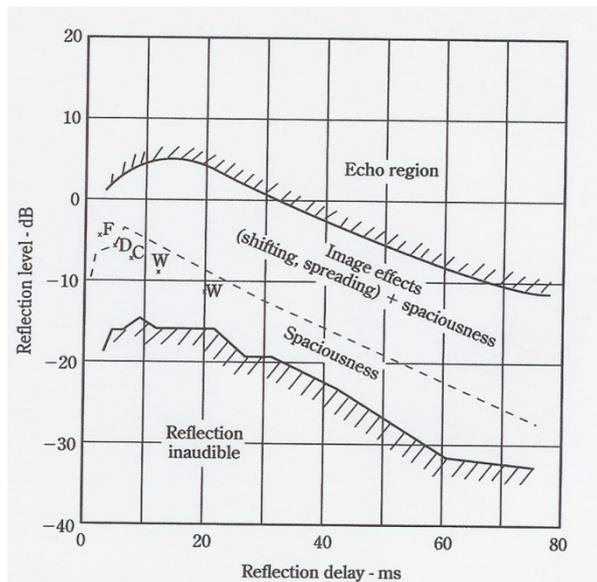
**Bild 29: Direkter und reflektierter Schall**



**Figure 29: Direct and reflected sound**

Das nachstehende Bild fasst einige Informationen zu Reflexionspegeln und Reflexionsverzögerungen zusammen, die in der Tabelle erläutert sind.

The figure below summarises some information about reflection level and reflection delay, that are explained in the subsequent table.



**Bild 30: Vergleich der Pegel und Verzögerungen der frühen Reflexionen**

**Figure 30: Comparison of the levels and delays of the early reflections**

Die Tabelle zeigt die Weglängen der Reflexionen F bis W, die ermöglichen sollen, das Bild zu verstehen und gibt einige allgemeine Informationen zum Entwurf von Hörräumen. Der Fall basiert auf der Erfahrung mit einem Raum folgender Abmessungen:

The table shows the path lengths for the reflections F to W that helps to understand the figure, and allows for the extraction of some general information for the design of listening rooms. This case is based on the experience for a room with the following dimensions:

Schallweg Sound path	Weglänge Path length (m)	Reflexion, direkt Reflection, direct (m)	Reflexionspegel Reflection level (dB)	Verzögerung Delay (ms)
Direkt Direct	2,44			
F (Boden) (Floor)	3,20	7,62	-2,4	2,2
D (Lautsprecherwand) (Diff)	3,20	7,62	-2,4	2,2
C (Decke) (Ceiling)	4,88	2,44	-6,0	7,1
W (nahe Wand) (near wall)	4,27	1,83	-4,9	5,3
W (ferne Wand) (far wall)	6,40	3,96	-8,4	11,5
F (Rückwand) (rear)	9,33	6,89	-11,7	20,0
G (Seitenwände und Rückwand) (lateral and rear)	13,5	11,06	-14,9	32,1

**Tabelle 31: Reflexionen in einem Raum: 3 (Höhe) x 4,87 (Breite) x 6,5 (Länge) m**

**Table 31: Reflections in a room: 3 (height) x 4,87 (width) x 6,5 (length) m**

Um die Pegel der frühen Reflexionen zu reduzieren, kann man die Stirnseite des Raumes behandeln. Wenn diese Behandlung den Raum zu „tot“ macht, ist es erforderlich, nur ein Minimum an absorbierendem Material an den Flächen anzubringen, die für die Reflexionen verantwortlich sind. Mit Hilfe eines Spiegels kann man diese Flächen ermitteln.

To reduce the levels of the early reflections, the front portion of the room can be treated. If this treatment makes the room too dead, it should be necessary to add a minimum of absorbing material only on the specific surfaces responsible for the reflections. These surfaces can be located with the help of a mirror.

Die Installation eines Absorbers an der Wand zwischen den Lautsprechern sollte die Beugungsreflexionen reduzieren, die sehr schwierig zu lokalisieren sind.

The installation of an absorber on the wall between the loudspeakers should reduce diffraction reflections which are more difficult to locate.

### A5-3.10.3 Kleine Aufnahmestudios

### A5-3.10.3 Small recording studios

Beim Entwurf eines Studios ist das Raumvolumen zu beachten, ferner die Raumproportionen, die Schallabklingrate (Nachhallzeit), aber auch die Ausbreitung und Dämpfung von Störgeräuschen.

In designing a studio, attention should be given to the room volume, the room proportions, the sound decay rate (reverberation time), but also to diffusion and isolation from interfering noise.

In der Tabelle werden Studioabmessungen für günstige Modenverteilungen angegeben.

In the table, studio dimensions are given for favourable mode distribution.

	Verhältnis (siehe A5-3.10.2) Ratio (see A5-3.10.2)	Kleines Studio Small studio	Mittleres Studio Medium studio	Großes Studio Large studio
Höhe Height	1,00	2,44	3,66	4,88
Breite Width	1,28	3,12	4,69	6,25
Länge Length	1,54	3,76	5,64	7,52

**Tabelle 32: Studioabmessungen für günstige axiale Modenverteilung**

**Table 32: Studio dimensions for favourable axial mode distribution**

Die gewählten Raumproportionen ergeben keine perfekte Verteilung der modalen Frequenzen, da es noch andere als die axialen Moden gibt. Die größere diagonale Abmessung eines Raumes gibt die tiefen Frequenzen am besten wieder und wird durch die Raumresonanzen der diagonalen Moden unterstützt.

The room proportions selected do not yield perfect distribution of modal frequencies, because other modes than axial are present. The major diagonal dimension of a room better represents the lowest frequency supported by room resonances because of the oblique modes.

Um die Bedeutung der „Modenverteilung“ zu verstehen, kann angenommen werden, dass die Antwort des Studios die Gesamtsumme der Antworten der einzelnen Moden ist, wenn diese angeregt werden (in der Vorstellung ist das Studio ein Saiteninstrument).

To understand the meaning of the “mode distribution”, it can be assumed that the response of the studio is the sum total of the responses of the individual modes, when excited (supposed the studio is a stringed instrument).

Ein Studio mit sehr geringem Volumen hat grundsätzliche Antwortprobleme bezüglich der Raumresonanzen; größere Studiolumen ergeben glattere Resonanzen. Ein würfelförmiger Raum verteilt die modalen Frequenzen in der schlechtest möglichen Weise; wenn man jeweils zwei Dimensionen als Vielfaches voneinander hat, entsteht diese Art von Problemen. Jedenfalls sind die perfekten Raumproportionen noch nicht gefunden worden. Es ist nötig, über das Thema Raumresonanzen gut informiert und sich bestimmter Konsequenzen bewusst zu sein, um einen guten Studioentwurf sicherzustellen.

Es ist nicht richtig, die Nachhallzeit zu benutzen, die mit kleinen Studios zusammenhängt, in denen Diffusfelder nicht existieren. Als erste Annäherung an das Problem jedoch ist das ein nützlicher Parameter. Es gibt vielfältige Informationen zu der Nachhallzeit oder der Schallabklingrate. Als eine generelle Annäherung kann eine Nachhallzeit von  $0,3 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$ , bewertet für Terzen von 63 Hz bis 8000 Hz angegeben werden.

Um den höchsten Schallpegel einzuschätzen, der mit der vorgesehenen Aktivität im Aufnahmerraum übereinstimmt, können einige international akzeptierte Empfehlungen benutzt werden. Die verbreitetsten sind die NC oder NCB von Beranek. Kapitel A5-2.5 behandelt das Thema.

Um die Pegel dieser Empfehlungen zu erreichen, müssen die Dämpfungsregeln angewendet werden (siehe Dokumente A3 und A6).

#### A5-3.10.4 Kontrollraum

Trotz der Verbreitung von Entwurfstechniken ist die abschließende Frage immer gewesen: „Klingt es gut?“, wobei „gut“ oft nicht definiert ist.

Ein Kontrollraum sollte neutral sein, er sollte dem durch die Lautsprecher erzeugten Schall so wenige Einfärbungen wie möglich hinzufügen. Aus diesem Grund ist die Qualität der Lautsprecher sehr wichtig: Schlecht entworfene Lautsprecher sollen ihre Fehler zu erkennen geben und gute sollten ihre Vorzüge zeigen.

Es ist nötig, den Frequenzgang, die Richtcharakteristik, die Richtwirkung und die Empfindlichkeit der Lautsprecher zu studieren.

Mit der Zeit haben sich verschiedene Theorien zur Qualität von Kontrollräumen entwickelt. Anfänglich haben sich die Bemühungen, den hörbaren Einfluss des Kontrollraumes zu beherrschen, hauptsächlich um die tieffrequenten Raummoden gedreht und um gleichmäßige hochfrequente Schallfelder an den bevorzugten Hörerpositionen. In den 80er Jahren wurde auch die psychoakustische Bedeutung von Schallfeldern innerhalb des Kontrollraumes in die Entwurfskriterien aufgenommen, wobei die LEDE-Räume (live-and-dead-end) am wichtigsten waren. Dieses „LEDE“-System besteht aus einem zur Hälfte halligen Kontrollraum mit Schall absorbierenden Flächen (totes Ende) um die Lautsprecher und Schall reflektierenden Flächen (life end) hinter dem Kontrollpult (siehe Zeichnung 2 im nächsten Bild).

Der traditionelle Ansatz führte zu sehr diffusen, häufig asymmetrischen Räumen. Später gaben die Fortschritte in zeitversetzten Messsystemen Anlass zu Versuchen, das direkte Signal des Monitorlautsprechers zu bewahren, indem die schnellen Reflexionen von der Vorderseite des Kontrollraumes ausgeblendet wurden.

In der Praxis hängt der erfolgreiche Entwurf eines Kontrollraumes von vielen Faktoren ab (Geräte, Dämpfung, ...). Für alle Parameter muss ein Kompromiss zwischen Benutzerakzeptanz, Kosten und Theorie gefunden werden. Der richtige Entwurf ist Sache für Spezialisten, aber einige allgemeine Ratschläge müssen beachtet werden (beachten Sie, dass manche Theorien oder Richtungen sich mit der Zeit verändern).

A studio having a very small volume has fundamental response problems in regard to room resonances; greater studio volumes yield smoother responses. A cubical room distributes modal frequencies in the worst possible way; having any two dimensions in multiple relationship results in this type of problem. Anyway, the perfect room proportions have yet to be found. It is necessary to be well informed on the subject of room resonances and to be aware of certain consequences in order to guarantee a good studio design.

It is not very correct to use the reverberation time associated with small spaces in which random sound fields do not exist. Anyway, in a first approximation of the problem, it is a useful parameter. There are many informations regarding the reverberation time or the sound decay rate. As a general approximation, a reverberation time of  $0,3 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$ , weighted for the third-octaves 63 Hz to 8000 Hz, can be given.

To evaluate the maximum sound pressure level consistent with the activity of the recording room, some internationally accepted recommendations can be used. The most widely used are the NC or NCB, from Beranek. Chapter A5-2.5 deals with this subject.

In order to reach the levels of those recommendations, the rules of the isolation must be applied (see documents A3 and A6).

#### A5-3.10.4 Control room

Despite the proliferation of design techniques, the ultimate emphasis has always been on “does it sound good?“, with “good“ often undefined.

A control room should be neutral, it should add as few sonic colorations as possible to the sound generated by the monitor loudspeakers. Because of this reason, the quality of loudspeakers is very important: Poorly designed loudspeakers should exhibit their flaws, and well-designed ones should demonstrate their assets.

It is necessary to study the frequency response, directivity, polar response and sensitivity of the loudspeakers.

There are different theories regarding the quality of the control room that have developed over time. At the beginning, efforts of controlling the audible influence of the control room were primarily concerned with low-frequency room modes and uniform high-frequency sound fields at the preferred listening positions. In the 80's, the psycho-acoustic importance of sound fields within the control room has entered into the design criteria, being the most important the LEDE (live-and-dead-end) rooms. This “LEDE” system consists of a semi-reverberant control room with sound-absorbing surfaces (dead end) around the loudspeakers and sound-reflecting surfaces (life end) behind the control desk (see sketch 2 in the figure below).

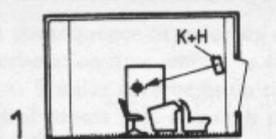
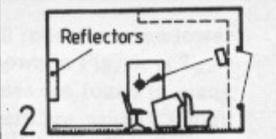
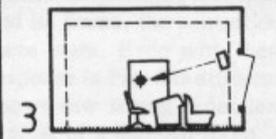
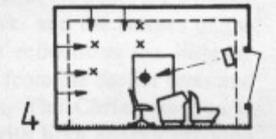
The traditional approach led to highly diffuse, asymmetrical rooms. Later, the advances in time discriminative measuring systems have given rise to attempts of preserving the direct signal of the monitor loudspeakers by eliminating short delayed reflections from the front of the control room.

In practice, the design of a successful control room is dependent upon many factors (equipment, isolation, ...). For all parameters, a compromise must be found between user acceptance, cost and theory. The right design must be made by specialists, but some general advices must be taken into account (note that some theories or tendencies can vary over time).

1. Diskrete Reflexionen mit hoher Amplitude sollten durch Optimierung der Raumgeometrie und des Innenausbaus vermieden werden. Solche Reflexionen erzeugen eine hörbare Verschlechterung des Signals, gleichgültig wo sich die reflektierende Fläche befindet.
  2. Die Geschlossenheit des direkten Schallfeldes muss bewahrt werden. Dies bedeutet eine Reduktion in Pegel und Anzahl der frühen Reflexionen von den Monitorregalen, den Mischkonsolen, usw. Diese Bestrebungen werden unterstützt, indem man die waagerechten und senkrechten Abstände der Monitorlautsprecher so klein wie möglich hält, um die gegenseitige Beeinträchtigung, die aus ungenauer Positionierung entsteht, zu reduzieren.
  3. Ein Teil der akustischen Energie muss an die Hörposition reflektiert werden, um das Hörwohlbeinden des Benutzers sicherzustellen. Diese fast nebensächliche akustische Energie sollte keine spektralen Spitzen über 3 dB aufweisen, wenn sie über ein Terzband gemessen wird, und nicht mehr als 6 dB für einzelne Frequenzen betragen. Im Durchschnitt sollte sie mindestens 15 dB unterhalb des direkten Signals liegen.
  4. Die Monitorlautsprecher sollten in einer senkrechten Ebene positioniert werden, die mit typischen Mikrofonen und Instrumentenpositionen im Einklang sind.
1. High-amplitude, discrete reflections should be avoided by optimisation of room geometry and finishes. These reflections create audible degradation of the signal, regardless of the location of the reflecting surface.
  2. The integrity of the direct sound field must be maintained. This means reduction in the level and number of early reflections from monitor shelves, mixing consoles, etc. This effort is enhanced by keeping the vertical and horizontal displacement of the monitor loudspeakers at a minimum to reduce pinnate time delay and cross-sensory cues that result in imprecise localisation.
  3. Some acoustic energy must be reflected to the listening position to ensure users' acoustic comfort. This almost random acoustical energy should exhibit no spectral peaks greater than 3 dB when measured over a one-third-octave interval and 6 dB for discrete frequencies, and should average at least 15 dB lower than the direct signal.
  4. Monitor loudspeakers should be located in the vertical plane in a position consistent with typical microphone and instrumental locations.

Weitere Informationen können dem nächsten Bild entnommen werden.

More information is obtained from the next figure.

			
Nachhall $T_m \sim 0,7$ s Reverberant $T_m \sim 0,7$ s	LEDE $T_m \sim 0,4$ s	Gedämpft $T_m \sim 0,2$ s Damped $T_m \sim 0,2$ s	Gedämpft $T_m \sim 0,2$ s mit 24 Lautsprechern Damped $T_m \sim 0,2$ s with 24 loudspeakers
Boden Floor Teppich auf schwimmendem Estrich Carpet on floating screed	Holzflächen auf Teppich auf schwimmendem Estrich Wood board on carpet on floating screed	Teppich auf schwimmendem Estrich Carpet on floating screed	Teppich auf schwimmendem Estrich Carpet on floating screed
Decke Ceiling Holzflächen verschiedener Dicke Wood boards of various thickness	Schallabsorber 5 – 15 cm an der vorderen Hälfte. Rückseite wie bei 1 Sound absorbers 5 – 15 cm on front half Rear half as 1	Wie bei 2, alle Flächen Schall absorbierend, 5 – 15 cm dick As 2, surfaces sound absorbing, 5 – 15 cm thick	Wie bei 3, 5 Lautsprecher As 3, 5 loudspeakers
Wände Walls Holzflächen verschiedener Dicken. Hinter dem Holz Mineralfasern Wood board of various thickness Wood with mineral fibre behind	Wie 1, zusätzlich an der Vorderseite 10 – 20 cm Mineralfasern um die Befestigung. Rückwand mit Reflektoren As 1, also in the front half 10 – 20 cm mineral fibre around fastener Rear wall with reflectors	Wie bei 2, alle Flächen mit 10 – 20 cm Mineralfasern As 2, all surface with 10 – 20 cm mineral fibre	Wie bei 3, 19 Lautsprecher Rückwand 9 Seitenwand an der Türseite 4 Seitenwand 6 As 3, 19 loudspeakers Rear wall 9 Side wall, door side 4 Side wall 6

**Bild 31: Verschiedene Typen von Kontrollräumen**

**Figure 31: Different kinds of control rooms**

Die Qualität der Musikwiedergabe für die vier Kontrollräume im obigen Bild wurde durch 90 Personen beurteilt, um den Einfluss der verschiedenen Kontrollräume auf die Hörbedingungen zu ermitteln.

The quality of music reproduction in the four control rooms shown above was judged by 90 persons in order to determine the influence of the listening conditions of different control rooms.

Die Ergebnisse sind:

The results are:

- Der hallige Kontrollraum 1 wurde für Kammermusik und Kirchenorgeln bevorzugt.
- LEDE (Raum 2) wurde für Schlagzeug-, Soli- und Diskomusik bevorzugt, gefolgt von dem nicht halligen Raum 3. Dieses Urteil kann womöglich auf Pop-, Country-, Jazz- und Tanzmusik ausgedehnt werden.

- The reverberant control room 1 was preferred for chamber music and church organ.
- LEDE (room 2) was preferred for drum solo and disco music, followed by the non-reverberant room 3. This can be probably extended to pop, country, jazz and dance music.

Die Schlussfolgerung ist, dass ein Kompromiss im akustischen Entwurf für Kontrollräume nötig ist, wenn sie für mehrere Musikarten benutzt werden sollen. Kontrollräume für einen speziellen Gebrauch können ganz gezielt entworfen werden.

it is conducted that a compromise is necessary in the acoustic design of control rooms when they are to be used for many types of music. Control rooms for a specific use can follow a particular design.

#### A5-3.10.5 Anforderungen, Berechnungen und Empfehlungen

#### A5-3.10.5 Requirements, calculations and recommendations

Einige brauchbare Ideen für den Studioentwurf sind in der vorstehenden Information gegeben worden. Nachfolgend werden einige allgemeinen Werte und Kriterien als Richtlinie für die Charakterisierung solcher akustischer Räume angegeben. Die Empfehlungen im nächsten Kapitel stammen von der BBC (British Broadcasting Corporation) und der EBU (European Broadcasting Union).

Some useful ideas regarding the studio design have been given in the previous information. In the following, some general values and criteria are given in order to guide the characterisation of such acoustic rooms. In the following chapter, some recommendations according to the BBC (British Broadcasting Corporation) and the EBU (European Broadcasting Union) are given.

##### A5-3.10.5.1 BBC-Empfehlungen

##### A5-3.10.5.1 BBC recommendations

Die Geräuschgrenzwerte für das Hintergrundgeräusch bei normalen Arbeitsbedingungen (mit Klimaanlage und anderen störenden Außengeräuschen) sind in Tabelle 33 angegeben.

The noise limit values of the background noise at normal working conditions (with air-conditioning units and other outside disturbing noise effects) are given in Table 33.

	Hz	63	125	250	$L_{Aeq}$	NR
1. Sprachaufnahmezimmer <i>Speech recording rooms</i>	dB	36	22	15	15/20	10/15
2. Videovertonungsstudios, Produktionsräume und Fernsehstudios <i>Video-sound recording studios, production rooms and TV studios</i>	dB	51	38	29	29	20
3. Technische Räume <i>Technical rooms</i>	dB	59	48	40	35	30

**Tabelle 33: Grenzanforderungen für Hintergrundgeräusch**

**Table 33: Limit requirements for background noise**

Für spezielle Zwecke können höhere Anforderungen an die Schalldämmung erforderlich sein, um das höchst zulässige Hintergrundgeräusch einzuhalten.

For special purposes, higher sound insulation requirements may be needed to meet the background noise requirements.

##### Raumakustische Anforderungen

Die bevorzugten Nachhallzeiten sind in den Frequenzen von 125 Hz bis 4000 Hz angegeben. In diesem Bereich werden die Schallabsorptionsdaten für verschiedene werkmäßige Produkte angegeben, innerhalb derer der Entwurf berechnet werden kann, um bestimmte erwartete Werte zu erreichen. Im Bereich von 80 Hz bis 125 Hz und von 4000 Hz bis 8000 Hz können nur Schätzwerte angegeben werden. Nachstehend werden die mittleren Nachhallzeiten  $T_m$  angegeben, gemessen in den Oktavbändern (Sekunden) von 125 Hz bis 4000 Hz. Diese bevorzugten mittleren Nachhallzeiten unter Arbeitsbedingungen (z. B. mit Vorhängen, Ausrüstung, usw.) sind im nachstehenden Beispiel wie folgt:

##### Room acoustic requirements

The preferred reverberation time values are given in the frequency range of 125 Hz to 4000 Hz. This is the range in which the sound absorption data for different manufacturer products are given and inside which the design can be calculated to meet certain expected values. In the ranges of 80 Hz to 125 Hz and 4000 Hz to 8000 Hz, only estimated values could be given. Below, the mean reverberation time values  $T_m$  are given, measured in the 125 Hz to 4000 Hz octave bands (seconds). The preferred mean reverberation time values under operating conditions (e. g. with curtains, equipment, etc.) are in the example below as follows:

Studio:	$V \approx 200 \text{ m}^3$ , $T_m = 0,4 \text{ s}$	
Toleranzen:	im 250 Hz bis 3150 Hz Bereich $\pm 0,05 \text{ s}$ unter 250 Hz 25 % zunehmend $T_m = 0,3 \text{ s}$ bis 0,4 s	
Ton- und Bildregie- und -wiedergaberäume:		Toleranzen: im 250 Hz bis 3150 Hz Bereich $\pm 0,05 \text{ s}$

Studio:	$V \approx 200 \text{ m}^3$ , $T_m = 0,4 \text{ s}$	
Tolerances:	in 250 Hz to 3150 Hz range $\pm 0,05 \text{ s}$  under 250 Hz, 25% increasing $T_m = 0,3 \text{ s}$ to 0,4 s	
Sound and picture directing and replay rooms:		Tolerances: in 250 Hz to 3150 Hz range, $\pm 0,05 \text{ s}$

##### A5-3.10.5.2 EBU-Empfehlungen

##### A5-3.10.5.2 EBU recommendations

Die hier dargelegten Hörempfehlungen sind im Wesentlichen für die folgenden zwei Situationen maßgeblich: *Hörräume* (benutzt für die kritische Bewertung und Auswahl von Programmmaterial für die Aufnahme in Ton- oder Fernsehsendungen) und *Tonqualitätskontrollräume* (benutzt für die kritische Einschätzung der Tonqualität als Teil des Produktionsprozesses von Ton- oder Fernsehsendungen).

The listening conditions specified here are essentially relevant in the following two situations: *listening rooms* (used for the critical assessment and selection of programme material for inclusion in a sound or television broadcaster's programme output) and *high-quality sound control rooms* (used for the critical assessment of sound quality as part of the sound or television broadcast production process).

Die Qualität der Hörbedingungen in einem Hörraum wird durch die Eigenschaften des vom Monitorlautsprecher produzierten Schallfeldes im Hörbereich in der Höhe des Ohres des Hörers (ca. 1,2 m) bestimmt. Um die akustische Leistung eines solchen Schallfeldes zu verbessern, werden die Werte einiger akustischer Parameter angegeben.

The quality of the listening conditions in a listening room is defined by the properties of the sound field produced by the monitor loudspeaker in the listening area at the height of the listener ear (about 1,2 m). In order to improve the acoustical performance of such sound field, the values of some acoustic parameters are given.

**Direkter Schall:** Seine Qualität wird von den maßgeblichen Lautsprechereigenschaften bestimmt, die der Bibliographie zu entnehmen sind.

**Frühe Reflexionen:** Diese sind Reflexionen von umliegenden Flächen oder anderen Flächen des Raumes, die in den ersten 15 ms nach Eintreffen des Direktschalls an der Hörerposition ankommen. Die Pegel dieser Reflexionen sollten mindestens 10 dB unter dem Pegel des Direktschalls für sämtliche Frequenzen im Bereich von 1 kHz bis 8 kHz liegen.

**Nachhallzeit:** Sie sollte im Hörraum mit Terzfilterung gemessen werden, wobei die Lautsprecher als Schallquelle benutzt werden. Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig. Der Wert T ist der Durchschnitt der gemessenen Nachhallzeiten in den Terzbändern von 200 Hz bis 4 kHz. Die Nachhallzeit T sollte zwischen  $0,2 < T < 0,4$  s liegen. Um sicherzustellen, dass das akustische Umfeld „natürlich“ bleibt, sollte der Wert für T mit der Raumgröße zunehmen. Nachstehende Formel gilt als Anhalt.

$$T = 0,25 (V / V_0)^{1/3}$$

wobei V das Raumvolumen in  $m^3$  und  $V_0$  ein Referenzvolumen von  $100 m^3$  ist.

Die Anwendung dieser Formel führt zu einem „idealen“ Verhältnis zwischen T und V. Der praktische Entwurf sollte so dicht wie möglich an dieses „ideale“ Verhältnis herankommen.

In den EBU-Empfehlungen gibt es noch einige Informationen zu den Toleranz- und Frequenzunterschieden für die Nachhallzeit.

**Hintergrundgeräusch:** Der Schalldruckpegel (RMS, slow) des kontinuierlichen Hintergrundgeräusches von Klimaanlage oder anderen inneren oder äußeren Quellen sollte möglichst NR 10 nicht überschreiten, wenn er im Hörbereich in einer Höhe von 1,2 m über dem Boden gemessen wird. Unter keinen Umständen sollte das Hintergrundgeräusch NR 15 überschreiten (siehe A5-2.5.3, Bild 15).

### A5-3.10.5.3 Andere Empfehlungen

Als weitere Informationen werden einige Empfehlungen gegeben, die auf amerikanischer Literatur basieren.

Bezüglich der Nachhallzeit zeigt das nächste Bild vorgeschlagene Nachhallzeiten für Aufnahmestudios. Der Bereich zwischen den Kurven ist eine Kompromissregion für Studios, in denen sowohl Musik als auch Sprache aufgenommen wird.

**Direct sound:** Its quality is determined by the relevant loudspeaker parameters which can be obtained from the bibliography.

**Early reflections:** These are defined as reflections from boundary surfaces or other surfaces in the room which reach the listening area within the first 15 ms after the arrival of the direct sound. The levels of these reflections should be at least 10 dB below the level of the direct sound for all frequencies in the range of 1 kHz to 8 kHz.

**Reverberation time:** It should be measured in the listening room with third-octave filtering using the loudspeakers of the sound sources. Reverberation time is frequency-dependent. The value T should lie in the range  $0,2 < T < 0,4$  s. To ensure that the acoustic environment remains „natural“, the value T should increase with the size of the room. The following formula is given as a guide.

where V is the room volume in  $m^3$  and  $V_0$  the reference room volume of  $100 m^3$ .

The application of this formula leads to an „ideal“ relation between T and V. Practical design should come as close as possible to this „ideal“ relation.

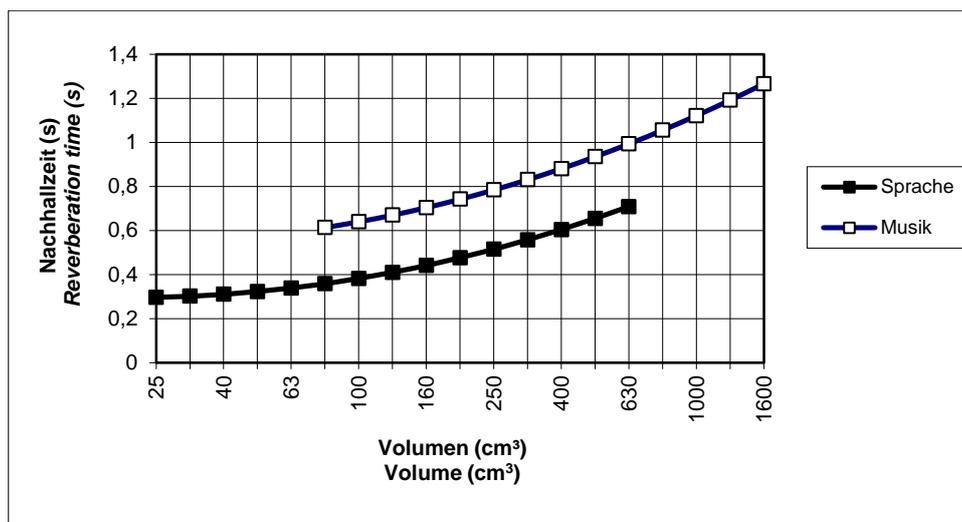
In the EBU recommendations, some information regarding tolerance and frequency differences of the reverberation time are given.

**Background noise:** The sound pressure level (RMS, slow) of the continuous background noise from air-conditioning systems or other external or internal sources, measured in the listening area at a height of about 1,2 m above the floor level, should preferably not exceed NR 10. Under no circumstances should the background noise exceed NR 15 (see A5-2.5.3, Figure 15).

### A5-3.10.5.3 Other recommendations

Some recommendations based on American literature are given as complementary information.

Regarding the reverberation time, the figure below shows the suggested reverberation times for recording studios. The area between the curves is a compromise region for studios in which both music and speech are recorded.



**Bild 32: Empfohlene Nachhallzeit in Aufnahmestudios**

**Figure 32: Recommended reverberation time in recording studios**

Die Berechnung der Nachhallzeit geschieht gemäß der Information im Kapitel A5-2.1.3 und gemäß dem Beispiel im Kapitel A5-3.3.2 (in diesem Beispiel wird die benötigte Absorption für ein vorgegebenes T berechnet, aber die Methode ist die gleiche, um T zu berechnen in Abhängigkeit von der Absorption eines Raumes).

Für das Hintergrundgeräusch kann  $NBC - 10$  (ca. 10 dB(A)) oder  $NBC < 25$  (< 33 dB(A)) benutzt werden. Im Kapitel A5-4.2 ist die Berechnung erklärt, gemäß den Schallmessungen und unter Berücksichtigung der Sprachverständlichkeit. Wenn das Hintergrundgeräusch vorausgesagt werden soll, müssen die Dämmung des Raumes (Wände, Fenster, ...) und die Geräuschprobleme des Ventilationssystems berücksichtigt werden. Die Dokumente A3 und A6 behandeln diesen Gegenstand.

#### A5-3.10.5.4 Anmerkung zur Abklingrate

Wie zuvor erklärt, gibt es einige Schwierigkeiten bei der Anwendung des Konzepts der Nachhallzeit für kleine Räume, wie z. B. Hörräume oder Aufnahmestudios. Die klassischen Nachhallgleichungen gehen von der Annahme eines diffusen Schallfeldes aus, was jedoch für kleine Räume nicht zutrifft. Was für kleine Räume erforderlich ist, ist eine Regulierung der Reflexionen und der Modeneinflüsse.

Gelegentlich wird anstelle der Nachhallzeit die „Abklingzeit“ oder die „Abklingrate“ benutzt, aber die hängt auch von der Nachhallzeit ab.

#### A5-3.10.6 Schwierigkeit der Untersuchung

Alle hier angegebenen Informationen müssen als allgemeine Informationen angesehen werden, die für einige bestimmte Fälle nützlich sind. Wie schon dargelegt, werden viele Studios mit einem geringen Budget verwirklicht und ohne die Hilfe eines akustischen Beraters. In solchen Fällen, in denen die Erfahrung des Ausstatters theoretisches Hintergrundwissen ersetzen muss, kann diese Information helfen, das Ergebnis zu verbessern.

Tatsächlich ist jedoch für den richtigen Entwurf eines professionellen Studios die Hilfe eines Spezialisten erforderlich.

#### A5-3.11 Kinos

##### A5-3.11.1 Allgemeines

Der Soundtrack von Filmen wird unter akustischen Bedingungen aufgenommen, die zu der im Film gezeigten Handlung in Beziehung stehen. Um einen guten Filmtönen abzugeben, ist es erforderlich, dass die akustischen Bedingungen des Kinos den durch den Soundtrack beabsichtigten Eindruck nicht verfälschen. Deswegen sollten in Kinos Wand- und Deckenbehänge sicherstellen, dass über den gesamten Frequenzbereich eine gute Absorption erreicht wird.

Ferner ist die hohe Qualität des Beschallungssystems in Kinos sehr wichtig.

##### A5-3.11.2 Anforderungen und Empfehlungen

In Kinos wird der Wert NC 30 als Hintergrundgeräuschkriterium bevorzugt. Die Werte für das Schalldruckspektrum sind in Tabelle 34 angegeben.

	Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	LpA
NC 30	dB	57	48	41	35	31	29	28	39,8

**Tabelle 34: Bevorzugte Grenzen für Hintergrundgeräusche in Kinos**  
NC 30 – Oktavbandwerte und dB(A)

Die optimale Nachhallzeit  $T_m$  in den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 1000 Hz ist in leeren Kinos von unterschiedlicher Größe wie folgt:

$$V = 400 - 500 \text{ m}^3$$

The calculation of reverberation time is made according to the information given in chapter A5-2.1.3 and following the example given in chapter A5-3.3.2 (in this example, the needed absorption for a T given is calculated, but the method is the same, to calculate the T depending upon the absorption of the room).

For the background noise, the  $NBC - 10$  (about 10 dB(A)) or  $NBC < 25$  (< 33 dB(A)) can be used. In chapter A5-4.2 it is explained how to calculate it, according to the noise measurements and taking into account the intelligibility. If the background noise must be predicted, then the isolation of the room (walls, windows, ...

#### A5-3.10.5.4 Note on decay rate

As explained before, there are some difficulties at applying the concept of reverberation time to small rooms, such as listening rooms or recording studios. The classical reverberation equations have been derived on the assumption that a random sound field exists, which is not true in small rooms. What is needed in small rooms is to control reflections and mode effects.

Sometimes, instead of reverberation time, the “decay time” or “decay rate” is used, but it is also related to the reverberation time.

#### A5-3.10.6 Difficulty of study

All the information given in this chapter must be considered as general information, useful for some particular cases. As already explained, a high number of studios are made with low budgets and without the assistance of an acoustic consultant. In this case, in which the experience of the installer must replace the theoretical background, the information given can help to improve the results.

As a matter of fact, for the correct design of a professional studio the specialist advice is required.

#### A5-3.11 Cinemas

##### A5-3.11.1 General

The sound track of movies is recorded with an acoustic condition correlating with the action in the pictures. To provide an excellent movie sound, it is required that the acoustic condition of the cinema hall should not change the impression intended by the sound track. Therefore, in cinema halls, the wall and ceiling coverings should assure a high absorption in the whole frequency range.

Additionally, a high quality of the sound system is of very high importance in cinema halls.

##### A5-3.11.2 Requirements and recommendations

In cinemas, the NC 30 background noise criteria value is preferred. The sound pressure spectrum values are given in Table 34.

**Table 34: Preferred background noise limit values in cinemas**  
NC 30 – octave band values and dB(A)

The optimum reverberation time  $T_m$  in the mid-frequencies of 500 Hz to 1000 Hz in empty cinema halls with different volumes are given below:

$$T_m = 0,45 - 0,80 \text{ s,}$$

$V = 700 - 800 \text{ m}^3$	$T_m = 0,50 - 0,85 \text{ s}$ ,
$V = 1000 - 1300 \text{ m}^3$	$T_m = 0,55 - 0,90 \text{ s}$ ,
$V = 1500 - 1800 \text{ m}^3$	$T_m = 0,60 - 0,95 \text{ s}$ ,
$V = 2500 - 3000 \text{ m}^3$	$T_m = 0,70 - 1,05 \text{ s}$ ,
$V = 8000 \text{ m}^3$	$T_m = 0,90 - 1,30 \text{ s}$ ,

In Kinos ist es erforderlich, eine fast gleiche Nachhallzeit in den Oktavbändern des Frequenzbereichs von 63 Hz bis 8000 Hz zu erzielen.

In cinema halls, it is important to provide an almost equal reverberation time over the frequency range of 63 Hz to 8000 Hz in octave bands.

Die bevorzugte Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit  $T$  in den Oktavbändern in Kinos ist wie folgt:

The preferred frequency dependence of the reverberation time  $T$  in the octave bands in cinema halls is as follows:

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$T/T_m$	0,75-1,45	0,85-1,30	0,85-1,15	0,85-1,15	0,85-1,15	0,85-1,15	0,85-1,15	0,70-1,15

**Tabelle 35: Frequenzabhängigkeit der Nachhallzeit**

**Table 35: Frequency dependence of reverberation time**

### A5-3.12 Räume mit besonderen akustischen Anforderungen

### A5-3.12 Rooms with special acoustic requirements

#### A5-3.12.1 Hallräume

#### A5-3.12.1 Reverberation rooms

##### A5-3.12.1.1 Allgemeines

##### A5-3.12.1.1 General

Hallräume werden so konstruiert, dass der Schall so häufig wie möglich reflektiert wird; sie stellen damit das akustische Gegenteil eines reflexionsarmen Raumes dar. Zu diesem Zweck werden alle Wände, Decken und Böden aus reflektierendem Material gemacht, um das Schallfeld so diffus wie möglich zu machen. Wegen der harten, ebenen und glatten Flächen des Raumes erstirbt der Schall nur langsam. Im Fall eines ideal diffusen Feldes (stark halliger Raum) sollte der Schalldruckpegel konstant bleiben.

The reverberation room is constructed to reflect sound as much as possible, thus it is the acoustic opposite of an anechoic room. For this purpose, all the walls, the floor and the ceiling are made of reflective material in order to make the sound field as diffuse as possible. Due to the hard, flat and rigid surfaces in the room, the sound dies away slowly. In case of an ideal diffuse field (highly reverberant room), the sound pressure level should be constant.

Ein Hallraum ist zur Messung der Eigenschaften von Schall absorbierenden Materialien (gemäß ISO 354), für die Bestimmung der Schalleistungspegel von Schallquellen (gemäß ISO 3741 bis 3743) und für die Bestimmung des von Maschinen abgestrahlten Geräusches geeignet.

A reverberation room is suitable for measurements of the properties of sound-absorbing materials (according to ISO 354), for the determination of the sound power levels of sound sources (according to ISO 3741 to 3743) and for the determination of radiated noise from machines.

##### A5-3.12.1.2 Akustische Spezifikationen für Hallräume

##### A5-3.12.1.2 Acoustic specifications for reverberation rooms

Der Raum muss die Bedingungen der benutzten Norm erreichen. Nachstehend werden die theoretischen Anforderungen an einen Hallraum gemäß ISO 354 gegeben. Ferner sind einige Messwerte des Verhaltens tatsächlicher Hallräume angegeben.

The room has to meet the specifications of the standard used. Below, the theoretical requirements of a reverberation room according to ISO 354 are given. Some measured results of the performance of real reverberation rooms are also recorded.

Der Hallraum muss mindestens ein Raumvolumen von  $150 \text{ m}^3$  haben.  $200 \text{ m}^3$  werden empfohlen. Bezüglich der Geometrie muss Folgendes beachtet werden:

The reverberation room must have a volume of at least  $150 \text{ m}^3$ ,  $200 \text{ m}^3$  being recommended. For the geometry, the following rule must be respected:

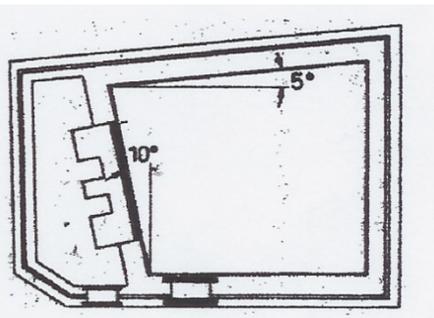
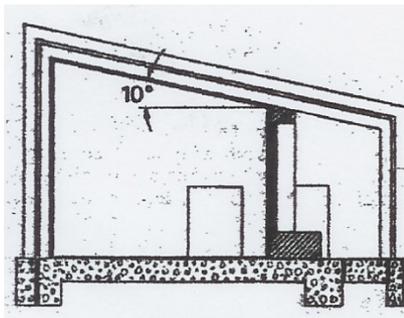
$$L_{\max} < 1,9 V^{1/3}$$

wobei  $L_{\max}$  das größte in den Raum einbezogene Element ist.

where  $L_{\max}$  is the largest segment inscribed in the room.

Die Flächen des Raumes müssen unterschiedliche Abmessungen haben, wie im Bild 33 für eine tatsächliche Auslegung gezeigt.

The surfaces of the room must have different dimensions, as shown in Figure 33 for a real case.

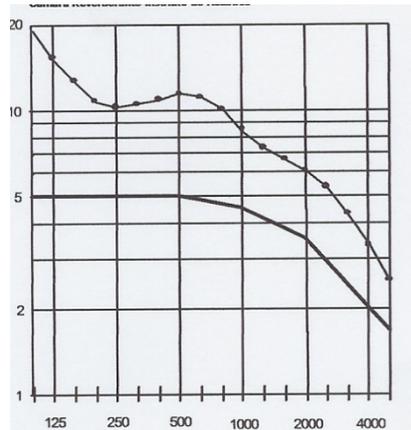


**Bild 33: Geometrie eines Beispiels für einen Hallraum**

**Figure 33: Geometry of an example of a reverberation room**

Im Bild 34 wird die kleinste Nachhallzeit  $T$  gemäß ISO 354 angegeben, verglichen mit dem  $T$  des tatsächlichen Hallraumes wie im Bild 35 gezeigt.

In Figure 34, the minimum reverberation time  $T$  according to ISO 354 is given, comparing it with the  $T$  of the real reverberation room shown in Figure 35.

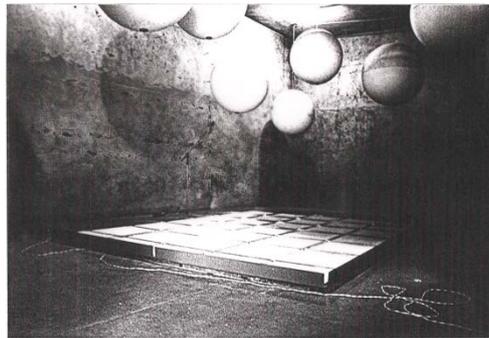


**Bild 34: Nachhallzeit  $T$ : Mindestmaß gemäß ISO 354, verglichen mit einem tatsächlichen Fall (gepunktete Kurve)**

**Figure 34: Reverberation time  $T$ : Minimum according to ISO 354, compared with a real case (curve with points)**

Ein diffuses Schallfeld muss im Hallraum durch die Einbeziehung von stationären oder rotierenden Diffusoren mit einer Mindestflächendichte von  $5 \text{ kg/m}^2$  erzeugt werden. Es wird empfohlen, Diffusoren mit verschiedenen Abmessungen, mit einer kleinen Krümmung, in zufälligen Winkeln des Raumes anzubringen. Eine Fotografie eines Hallraumes im Bild 35 zeigt die Diffusoren.

A diffuse sound field must be established in the reverberation room by the inclusion of stationary or rotating diffusers, with a minimum surface density of  $5 \text{ kg/m}^2$ . It is recommended to place diffusers of different dimensions, with a little curvature, at random angles in the room. A photograph of the reverberation room in Figure 35 shows the diffusers.



**Bild 35: Kugelförmige Diffusoren in einem Hallraum**

**Figure 35: Spherical diffusers in a reverberation room**

Das diffuse Feld ist der wichtigste Parameter eines Hallraumes.

The diffuse field is the most important parameter of a reverberation room.

ISO 354 gibt eine einfache Methode zum Erreichen eines guten diffusen Feldes an. Die Idee ist dabei, so lange Diffusoren hinzuzufügen, bis die Bedingungen eines diffusen Feldes erreicht sind.

ISO 354 gives a simple method to obtain a good diffuse field, the idea being to add diffusers until the condition of a diffuse field is reached.

### A5-3.12.2 Reflexionsarme Räume

### A5-3.12.2 Anechoic rooms

#### A5-3.12.2.1 Allgemeines

#### A5-3.12.2.1 General

Ein reflexionsarmer Raum ist ein Raum, in dem Freifeldbedingungen für die Schallausbreitung vorherrschen. Es bedeutet, dass das umgekehrte Schalldruckgesetz gilt. Die Wände, der Boden und die Decke sind mit Schall absorbierendem Material bedeckt (normalerweise Glasfaserkeile), um Reflexionen zu vermeiden und Freifeldbedingungen zu erreichen.

An anechoic chamber is a room in which free-field conditions for acoustical propagation exist. It means that the inverse law for the acoustical pressure applies. The walls, the floor and the ceiling are lined with sound-absorbing material (usually glass-fibre wedges) in order to avoid reflections and to reach the free-field conditions.

Der Raum muss gegen äußere Schallquellen durch ausreichende Schalldämmung der Wände und Türen abgeschirmt werden.

The room must be isolated from external sound sources using adequate sound isolation for the walls and doors.

Reflexionsarme Räume werden benutzt für:

Anechoic chambers are widely used for:

- Messung des Schalldruckpegels von Maschinen oder anderen Schallquellen, um ihren gerichteten Schalldruckpegel zu ermitteln,
- Messung von Prüfmikrofonen,

- measuring the sound pressure level of machinery or other sound sources in order to determine their directional sound power level,
- measuring testing microphones,

- Durchführung von psychoakustischen Experimenten,
- Messung der Übertragungsfunktionen von elektroakustischen Geräten,
- Messung von Schallpegeln in der Automobilindustrie.
- performing psycho-acoustic experiments,
- measuring the transfer functions of electro-acoustic devices,
- measuring sound levels in the automotive industry.

Diese Räume werden oft dem auf Keilen basierenden Modell eines reflexionsarmen Raumes nachgebildet, wobei typische Glasfaserkeile an den Wänden der Kammer benutzt werden, um eindringende Schallwellen zu absorbieren (siehe nächste Foto).

These chambers are often modelled after the wedge-based anechoic chamber model, using typical fibre-glass wedges on all walls of the chamber to absorb incoming sound waves (see next photo).



**Bild 36: Errichtung eines typischen reflexionsarmen Raumes mit Glasfaserkeilen**

**Figure 36: Erection of a typical anechoic room with fibre-glass wedges**

Eine andere Art des reflexionsarmen Raumes wird mit würfelförmigen oder zylindrischen nichthomogenen Glasfaserstücken gemacht: Die absorbierenden Wände sind aus Würfeln aufgebaut, die zur Innenseite hin klein sind und aus speziellen Glasfasern mit sehr geringer Dichte gemacht werden. Größe und Dichte nehmen mit zunehmender Entfernung vom Raummittelpunkt zu. Am Ende werden sie Zylinder. Dieses System ergibt eine bessere Absorption für hohe Frequenzen, ergibt für tiefe Frequenzen jedoch schlechte Ergebnisse.

Another kind of anechoic chamber is made with cube and cylindrical non-homogeneous fibre-glass pieces: the absorbing walls are built up with cubes which are small near the inside of the room and made of special glass fibres with a very low density. They increase in both size and density with increasing distance from the room centre. At the end, they become cylinders. This system presents a better absorption for high frequencies, but renders poor results for lower frequencies.

#### A5-3.12.2.2 Anforderungen und Empfehlungen

#### A5-3.12.2.2 Requirements and recommendations

Es gibt zwei Gruppen von reflexionsarmen Räumen:

There are two groups of anechoic chambers:

- Freifeldräume (reflexionsarme Räume)  
Alle Flächen sind absorbierend. Das kann ein kleiner Raum (z. B. Räume, die für die Prüfung von Mikrofonen oder Gehörhilfen benutzt werden) oder ein größerer Raum (für psychoakustische Arbeit) sein. Diese letzteren haben normalerweise Drahtnetzböden.
- Teilweise reflexionsarme Räume  
Diese haben einen schallreflektierenden Boden. Diese Prüfräume werden in der Industrie und in Universitäten immer häufiger. Kleine Räume werden zur Prüfung kleiner Motoren oder Werkzeugmaschinen benutzt, größere zur Prüfung von Motorrädern, Kühlschränken, ...  
Teilweise reflexionsarme Räume mit einem standardisierten Tisch werden benutzt, um das akustische Verhalten von Gegenständen zu prüfen, die normalerweise auf Tischen stehen, z. B. Computer.

- Free-field rooms (anechoic chambers)  
All surfaces are absorbing. It can be a small room (e. g. rooms used for testing microphones or hearing aids) or a larger one (for psycho-acoustic work). These latter have normally a wire-net floor.
- Semi-anechoic chambers  
They have a sound-reflecting floor. These test rooms are becoming the most common in industry and at universities. The small rooms are used for testing smaller motors, tool machinery, and the larger ones for testing motorcycles, refrigerators, ...  
Semi-anechoic chambers with a standardised tables are intended for measuring the acoustical performance of items which normally stay on a table, e. g. computers.

#### Akustische Anforderungen an reflexionsarme Räume

#### Acoustic requirements for anechoic chambers

Die Anforderungen an die absorbierende Behandlung der Innenseite von reflexionsarmen Räumen sind hoch; der Absorptionskoeffizient sollte mindestens 0,99 für alle Einfallswinkel betragen. Wenn die Oberfläche eines Raumes nur einen durchschnittlichen Absorptionskoeffizienten von 0,9 aufweist, würde der Schalldruckpegel der reflektierten Welle nur um 10 dB unter dem Schallpegel der einfallenden Welle liegen und der Raum würde einem Freifeld nicht nahe kommen.

The requirements for the absorptive treatment of the inside of anechoic chambers are high; the absorption coefficient should be at least 0,99 for all angles of incidence. If the surfaces of a room only had an average absorption coefficient of 0,9, the sound pressure level of the reflected wave would be 10 dB less than the incident, and the space would not approximate a free field.

Bei tiefen Frequenzen kann der Absorptionskoeffizient des Keils durch Messungen in einem Impedanzkanal ermittelt werden, für hohe Frequenzen ist die praktischste Methode, den fertigen Raum zu bewerten.

At low frequencies, the absorption coefficient of the wedge may be found from measurements in an impedance duct, at high frequencies, the most practical method is to evaluate the completed room.

Nachstehend beziehen wir uns auf ISO 3745, sie ist am interessantesten, da die Mehrzahl der reflexionsarmen Räume in der Industrie gemäß dieser Norm entworfen werden. Jedoch sind auch für andere Normen (z. B. für ISO 7779 „Akustik - Geräuschemissionsmessung an Geräten der Informations- und Telekommunikationstechnik“) die Prinzipien ähnlich.

ISO 3745, die sich mit Schalldruckmessungen befasst, gibt Informationen zu den Eigenschaften der Räume und deren Begrenzungen an:

- *Grenzfrequenz*: die niedrigste Frequenz, für die das reziproke Gesetz anwendbar ist. Sie ist demnach die niedrigste Frequenz für den Gebrauch in reflexionsarmen Räumen.
- *Abweichung* vom tatsächlichen Schalldruckpegelabfall vom theoretischen Abfall gemäß dem reziproken Gesetz.
- Höchstes *Hintergrundgeräusch*: dieses begrenzt den Schalldruckpegel, der gemessen werden kann, und die Schallquellen, die in dem Raum bewertet werden können.

Bezüglich der *Grenzfrequenz* müssen zwei Bedingungen beachtet werden:

- Es gibt eine Begrenzung für die Grenzfrequenz, bezogen auf die Abmessungen des Keils: Die Dicke der absorbierenden Auskleidung (Luftraum + Keil) ist  $> \lambda/4$ , wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der unteren betrachteten Mittenfrequenz (Terz) ist. Die Information zu der Absorption des Keils muss der Hersteller angeben. Üblicherweise wird diese Art Material (Glasfaserkeile) nicht in normale Lieferkataloge aufgenommen. Es wird auf Bestellung gefertigt. Der Hersteller gibt Informationen zu den Gesamtabsorption (Keil + Luftraum) an.
- Es gibt auch eine „geometrische“ Grenzfrequenz, bezogen auf die Abmessungen des Raumes und die Abmessungen der Quelle, die bewertet werden soll. Diese Bedingungen werden festgelegt, um Probleme mit dem „Nahfeld“ (in der Nähe der Quelle) und mit der Veränderung der akustischen Ausbreitung (in der Nähe der Keile) zu vermeiden. In ISO 3745 ist angegeben, wie man mit dieser zweiten Bedingung umgeht.

Für *Freifeldbedingungen* gemäß ISO 3745 muss das Ausmaß bestimmt werden, zu welchem die Ausbreitung einer Kugelwelle von dem idealen reziproken Gesetz abweicht.

Tabelle 36 zeigt die in der Norm angegebenen Maße für akzeptable Abweichungen vom reziproken Gesetz. Es ist zu beachten, dass dies für Schallpegelmessungen maßgeschneidert ist und die akzeptablen Abweichungen ziemlich groß sind, insbesondere wenn diese Bedingungen benutzt würden, um eine Messeinrichtung für Erstkalibrierungen zu bewerten.

Frequenz (Hz) <i>Frequency (Hz)</i>	Reflexionsarmer Raum höchste zulässige Abweichung <i>Anechoic room maximum deviation</i>	Teilweise reflexionsarmer Raum höchste zulässige Abweichung <i>Semi-anechoic room maximum deviation</i>
$f \leq 630$	$\pm 1,5$ dB	$\pm 2,5$ dB
$800 < f < 5000$	$\pm 1$ dB	$\pm 2$ dB
$f > 6300$	$\pm 1,5$ dB	$\pm 3$ dB

**Tabelle 36: Zulässige Abweichungen vom reziproken Gesetz (ISO 3745)**

Der Drahtnetzboden bewirkt einige Abweichungen vom theoretischen reziproken Gesetz, hauptsächlich für hohe Frequenzen ( $f > 2$  kHz). Diese Information stammt aus einigen, in tatsächlichen Räumen gemachten Prüfungen.

Das höchst zulässige Hintergrundgeräusch muss mindestens 6 dB unter dem Schalldruck, der gemessen werden soll, liegen. Die empfohlene Differenz ist 12 dB. Um diese Bedingungen zu erreichen, müssen die Regeln der Norm für die akustische Dämpfung angewendet werden. Es gibt keine Unterschiede bei abweichenden Situationen.

In the following we will refer to ISO 3745, as most interesting, due to the fact that a majority of anechoic chambers in industry are designed according to this standard. Even, for other standards (e. g. ISO 7779 "Acoustics – Airborne noise emitted for information technology and telecommunication equipment") the principles are similar.

ISO 3745, dealing with sound power measurements, gives information regarding the features of the chambers, and their limitations:

- *Cut-off frequency*: the lowest frequency for which the inverse square law for sound pressure is valid. It is thus the lowest frequency for the use of anechoic chambers.
- *Deviation* of the actual sound pressure level decreases from the theoretical decrease according to the inverse square law.
- Maximum background noise: this limits the sound pressure level that can be measured, and the sound sources which can be evaluated in the chamber.

Regarding the *cut-off frequency*, two considerations must be taken into account:

- There is a limitation of the cut-off frequency related to the dimension of the wedge: The thickness of the absorption lining (airspace + wedge)  $> \lambda/4$ , where  $\lambda$  is the wavelength of the lower mid-frequency (third-octave) of interest. Information regarding the absorption of the wedges must be obtained from the manufacturers. It is usual that this kind of material (fibre-glass wedges) is not shown in the standard commercial information. It is produced on request. The manufacturer will give information regarding the total absorption (wedge + airspace).
- There is also a "geometrical" cut-off frequency related to the dimensions of the chamber and the dimensions of the sound source which needs to be evaluated. These conditions are established to avoid problems with the "near field" (next to the source) and with the perturbation of the acoustical propagation (next to the wedges). In ISO 3745, advice is given on how to comply with this second condition.

For the *free-field conditions* according to ISO 3745, it is necessary to determine the extent to which the propagation of a spherically radiating wave deviates from the ideal inverse square law.

Table 36 shows the criteria set out in the standard for the acceptable deviations from the inverse square law. It must be taken into account that this is tailored for sound power measurements and the acceptable deviations are quite large, especially if these criteria were used to qualify a facility for primary calibrations.

**Table 36: Acceptable deviations from the inverse square law (ISO 3745)**

The wire-net floor originates some deviations from the theoretical inverse square law, mainly for high frequencies ( $f > 2$  kHz). This information comes from some tests made in real chambers.

The maximum background noise must be, at least, lower than 6 dB than the sound pressure level measured. The difference recommended is 12 dB, if possible. In order to guarantee these conditions, the rules and standards of the acoustic isolation must be applied. There are no differences with respect to other situations.

**A5-3.13 Räume mit hygienischen Anforderungen****A5-3.13.1 Allgemeines**

Reinräume sind heutzutage häufig in Produktionsbereichen der Lebensmittelindustrie. Sie sind auch häufig erforderlich, wo empfindliche Produkte produziert oder behandelt werden, in Laboratorien und in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen in der elektronischen oder Halbleitertechnik und schließlich im klinischen und pharmazeutischen Bereich. Die Raten für Ausschuss und Fehler können deutlich gesenkt werden, wenn diese Prozesse in „Reinräumen“ durchgeführt werden.

**A5-3.13.2 Anforderungen und Empfehlungen**

Der Hauptzweck von Reinraumtechnik ist die Vermeidung bzw. die Minderung von Luftverunreinigungen (Teilchen oder Keime). Das bedeutet, dass Klimatisierung und Belüftung dieser Räume oberste Priorität haben.

Es wird allgemein anerkannt, dass Reinraumeinrichtungen und -systeme

- integrierter Bestandteil der Klimatechnik sein sollten;
- die ständige Überwachung der Anzahl von Partikeln und/oder infektiösen Keimen, der Temperatur, der Feuchtigkeit, des Luftdrucks und des elektrischen Potenzialunterschiedes zwischen den Oberflächen des Reinraumes und der Umgebungsluft erlauben sollten;
- die Entfernung von Luftverschmutzungen auf dem kürzest möglichen Weg zur Vermeidung von Kontamination;
- Entwurf und Ausrüstung der Einrichtung in Reinräumen sollten den Regeln der Reinraumtechnik folgen für die Optimierung der Luftbewegung und die Minimierung von Abnutzung;
- der Entwurf von Arbeitsplätzen in Übereinstimmung mit Reinraumtechnikregeln.

Reinraumwände und -türen müssen glatt, ohne Lücken, leicht zu reinigen, antistatisch, leicht, einfach ersetzbar, widerstandsfähig gegen Desinfektionsmittel, stabil, Wärme isolierend und in den meisten Fällen auch Schall absorbierend sein.

Um dies zu erreichen, müssen die Materialien und Bauteile feuerbeständig sein, hohe Stabilität gegenüber Chemikalien, begrenzte Feuchteaufnahme, ein günstiges Reinigungsverhalten sowie optimierte hygienische und mikrobiologische Bedingungen und elektrostatische Eigenschaften aufweisen.

Bezüglich akustischer Anforderungen müssen Reinräume wie Arbeitsplätze betrachtet werden. Das bedeutet, dass die im Kapitel A5-3.4 beschriebenen Anforderungen genau wie die damit zusammenhängenden Empfehlungen und Verfahren für die Planung und Ausführung von Schallschutzmaßnahmen ebenfalls gelten.

**A5-3.13.3 Umgang mit Lärminderung**

Das Hauptproblem bei Schallschutz in Reinräumen ist die Wahl des geeigneten Materials. Die wichtigsten Anforderungen verlangen abriebfeste, glatte, geschlossene Oberflächen, die offensichtlich eine sehr geringe Absorptionskapazität aufweisen. Offenzellige, gut absorbierende Materialien andererseits widersprechen den Anforderungen bezüglich Feuchteaufnahme und mikrobiologischen Verhaltens, usw. Beispiele für taugliche Materialien sind:

- Trennwände aus beschichtetem Stahlblech oder rostfreiem Stahl (rostfreier Stahl ist für feuchte Bereiche sehr geeignet bzw. dort, wo Desinfektionsmittel häufig zum Einsatz kommen),
- Plastikmaterial für feuchte chemische Prozesse,
- absorbierende, offenzellige Schäume, die jedoch eine Haut ohne Löcher aufweisen müssen,
- Mineralfaserprodukte in Folie eingeschweißt,

**A5-3.13 Rooms with hygienic requirements****A5-3.13.1 General**

Clean rooms are nowadays frequently in many production areas of the food-producing industry. They are also frequently required when producing and dealing with susceptible products, in laboratories and research and development branches in the electronic and semi-conductor technology and last but not least in clinical and pharmaceutical areas. The ratios of failures and defects could be notably reduced through handling these processes in "clean rooms".

**A5-3.13.2 Requirements and recommendations**

The main purpose of clean room technology is the avoidance, respectively the minimisation of airborne pollution (particles or germs). This means that air-conditioning and ventilation of these rooms take maximum priority.

It is generally accepted that clean room installations and systems should

- be integral part of climatic technology;
- allow for continuous monitoring of the amount of particles and/or infective germs, the temperature, the humidity, the air pressure and the electrical potential differences between the surfaces in the clean room and the ambient air;
- the expulsion of aerial pollutions on the shortest possible way to avoid contamination;
- the design and equipment of installations in the clean room following the clean room technology rules for the optimisation of air movement and minimisation of abrasion;
- the workplace design in accordance with clean room technology rules.

Clean room walls and doors must be smooth, without gaps, easily to clean, anti-static, light, easily replaceable, resistant to disinfecting agents, stable, thermally insulating and in most cases also sound-absorbing.

To achieve this, the materials and building components used shall possess fire resistance, high stability opposite chemicals, limited moisture absorption, friendly behaviour to cleaning measures, optimum hygienic and microbiological conditions and electrostatic properties.

Regarding acoustical requirements, clean rooms must be seen as workstations. This means that the requirements described in chapter A5-3.4 as well as the related recommendations and procedures for planning and executing of sound reduction measures do also apply.

**A5-3.13.3 Dealing with noise reduction**

The main problem of noise protection in clean rooms is the selection of suitable materials. The prevailing requirements demand abrasion-resistant, smooth, closed surfaces which have obviously a very low absorption capacity. Open cellular, well absorbing materials on the other hand contradict the requirements regarding moisture absorption and microbiological behaviour, etc. Examples for suitable materials are:

- separating walls made of coated steel sheet or austenitic steel (austenitic steel is well suited in wet areas, respectively where the employment of disinfecting agents is frequent),
- plastic materials for wet chemical processes,
- absorbing, open cellular foams which, however, possess a skin without holes,
- mineral fibre products welded into a foil,

- Plattenresonatoren – Folienresonatoren.

Schallschutz in Reinräumen führt häufig zu Kompromissen mit der Konsequenz der Nichtbeachtung akustischer Anforderungen und der Konsequenz, dass sie damit als Lärmgebiete betrachtet werden, wo persönlicher Gehörschutz erforderlich ist, usw. – siehe Kapitel A5-3.4.2.

#### **A5-4 Verbesserung der akustischen Eigenschaften bestehender Räume: Messungen und Modellerstellung**

##### **A5-4.1 Allgemeines**

Manchmal ist die Verbesserung bzw. Anpassung kleinerer Auditorien oder anderer Räume erforderlich. Häufige Beispiele sind alte, religiös genutzte Räume in fortschreitenden Stadien des Verfalls, für die die einzige Möglichkeit weiterer Erhaltung darin besteht, sie für andere als die ursprünglich geplanten Zwecke zu benutzen.

Die akustischen Bedingungen solcher Räume sind häufig gänzlich ungeeignet für die neuen Zwecke und müssen daher angepasst werden. Beispiel: Der akustische „fokussierende“ Effekt von historisch gewölbten Wand- und Deckenflächen kann höchst unerwünscht sein, wenn z. B. eine alte Kirche in ein Krankenhaus umgewandelt wird.

In diesem Kapitel werden einige Empfehlungen für derartige Aufgaben unter praktischen Gesichtspunkten gegeben. Außerdem werden einige Informationen zu den Messungen und der Modellerstellung für Raumakustik im allgemeinen Fall gegeben (diese sind nicht nur nützlich, um die akustischen Eigenschaften bestehender Räume zu verbessern).

##### **A5-4.2 Messungen**

###### **A5-4.2.1 Messungen, wenn es nötig ist, bestehende Räume zu verbessern**

Die akustische Verbesserung, die unter diesen Bedingungen nötig ist zu planen und durchzuführen, ist nicht einfach. Akustische Kenntnisse und die Möglichkeit, die noch vorherrschenden akustischen Bedingungen in dem alten Umfeld zu messen, sind erforderlich, zusammen mit einer gewissen akustischen Erfahrung seitens des Ausführenden der Verbesserungsmaßnahmen. Häufig stellen jedoch die Budgets deutliche Grenzen, für das was gemacht werden kann, dar. Häufig ist das, was theoretisch möglich wäre, aus Budgetgründen nicht durchführbar.

Einige Ideen, wie man einen Kompromiss finden kann, sind unten angegeben. Ein entschiedener Vorteil akustischer Verbesserungsmaßnahmen im Vergleich zu gänzlichen Neuentwürfen besteht darin, dass man am Anfang der Verbesserungsaufgabe die akustischen Eigenschaften des bestehenden Umfeldes messtechnisch ermitteln kann.

Danach sollten die Verbesserungsmaßnahmen in folgenden Schritten erfolgen:

Messtechnische Ermittlung  
der vorherrschenden  
akustischen Bedingungen  
*Measurement of prevailing  
acoustic parameters*

Modell  
*Model*

Lösungen  
*Solutions*

Überprüfung  
*Verification*

Zunächst ist es nötig, dass bestehende akustische Verhalten, das den Grund der Verbesserungsnotwendigkeit darstellt, messtechnisch zu ermitteln. Die festgestellten Werte müssen dann in Relation zu den gewünschten Werten gesetzt werden, so dass Lösungen gefunden werden können, wie die gewünschten Eigenschaften am besten erreicht werden können.

- board resonators – foil board resonators.

Noise protection in clean rooms frequently leads to compromises with a consequence of the non-compliance with acoustical requirements and the consequence of being regarded noise areas where personal hearing protection is required, etc. – see chapter A5-3.4.2.

#### **A5-4 Improvement of acoustical characteristics of existing rooms: Measurements and modelling**

##### **A5-4.1 General**

Sometimes, an improvement respectively adaptation of old, small auditoria or other types of rooms is required. Frequent examples are antique religious spaces in advanced stages of deterioration, for which the only way of continued preservation is to dedicate them to a utilisation very different from what they were originally designed for.

The acoustic conditions of these rooms are most frequently absolutely unsuitable for the new purpose and therefore in need of adaptation. Example: The acoustical “focusing” effect of historically concave surfaces at walls and ceilings might be very undesirable in case e. g. an old church is transformed into a hospital.

In this chapter, we will suggest some ideas in order to make such a job under a practical approach. Also, we will give some information regarding measurements and modelling for room acoustics in the general case (useful not only to improve acoustical features of existing rooms).

##### **A5-4.2 Measurements**

###### **A5-4.2.1 Measurements when it is necessary to improve existing rooms**

To plan and design the acoustical improvement required under these conditions is not a simple task. Acoustical expertise and a capacity to measure the still prevailing acoustical conditions in the old environment are needed together with some acoustical experience on the part of the installer of the improvement measures. However, frequently limited budgets define quite strict limitations of what can be done. Frequently, one cannot do, because of budgetary registrations, what could theoretically be done.

Some ideas on how to strike the compromise required are given below. The decided advantage of acoustical improvement measures compared to the totally new design of an acoustical environment, is the possibility to start with a measurement of the acoustic performance of the old room at the outset of the improvement task.

Then, the improvement measures should follow these steps:

First, it is necessary to measure the acoustic performance that prevails and constitutes the reason for the need of improvements. These parameters have then to be set into relation to the desired ones, so that solutions can be found how the desired performance can best be obtained.

Die Anzahl akustischer Parameter, die ermittelt werden müssen, bevor die Verbesserung beginnt und nachdem sie abgeschlossen ist, hängt von der Art der vorgesehenen Verbesserung ab. Nachhallzeit ist ein stets benötigter Parameter, unabhängig davon, ob die zukünftige Raumnutzung für Musikdarbietungen oder für sprachliche Kommunikation gedacht ist. Nachhall ist die grundlegende Information, da sie ein Hinweis auf die Raumantwort ist. Zunächst ist es erforderlich, z. B. in sehr großen Hallen oder alten Kirchen, die Nachhallzeit in verschiedenen Teilen des Raumes zu ermitteln, da sie von Ort zu Ort unterschiedlich sein kann, je nach der Geometrie des Ortes und den Materialien auf dem Boden, an den Wänden und an der Decke in der Umgebung des Messpunktes. Die zu den Nachhallzeiten gewonnene Information an den verschiedenen Orten muss durch eine geometrische Studie der auftretenden Reflexionen vervollständigt werden. Dies erlaubt es zu beurteilen, wo es nötig ist, den Schall zu verstärken und wo Reflektoren platziert werden sollten.

Bereits diese beiden akustischen Parameter – Nachhall und Schallreflexion – erlauben eine befriedigende Verbesserung, wo weitergehende Nachforschungen in die akustischen Gesamtbedingungen eines Raumes durch Budgetgrenzen verhindert werden.

#### A5-4.2.2 Messungen in neuen Räumen

Der Zweck raumakustischer Messungen ist es, die Werte akustischer Parameter zu bestimmen, die den akustischen Raum beschreiben (z. B. um die Raumqualität zu bewerten oder zu überprüfen).

Da die meisten objektiven akustischen Parameter ( $T$ ,  $EDT$ ,  $C_{80}$ , usw.) durch Impulsantwortmessungen bestimmt werden können, versuchen die meisten Messmethoden, eine einfache nichtgerichtete Impulsantwort des Raumes zu ermitteln. Andere Parameter enthalten zusätzliche Informationen zur Richtcharakteristik ( $LE$ ,  $LEF$ ,  $IACC$ , usw.), wodurch die Messungen komplizierter werden: Man muss eine gerichtete Impulsantwort messen.

Es gibt verschiedene Techniken, die Impulsantwort zu messen und zu gruppieren.

Die Impulsantwort kann direkt gemessen werden oder sie kann indirekt bestimmt werden durch die gemessene Übertragungsfunktion mittels der inversen Fourier-Transformation.

Die Unterscheidung kann auch nach den Methoden getroffen werden, die auf der Art der benutzten Anregung beruhen. Die Anregung kann in schmalen oder breiten Frequenzbändern geschehen. Eine Schmalbandanregung ist typischerweise eine Sinus- oder Swept-Sinus-Anregung, wohingegen eine Breitbandanregung weißes / rosa Rauschen sein kann oder auch ein Impuls (Schlag, Gewehrschuss, usw.).

Man kann die Messungen auch nach Frequenzbereich oder Zeitbereich unterscheiden.

Eine der modernsten und häufigsten Techniken ist die Benutzung von Pseudozufallssignalen (z. B. maximale Sequenzlänge) als Anregung. Die Impulsantwort wird dann als Kreuzkorrelation der bekannten Anregung und des Antwortsignals ermittelt. Der Nachteil dieser Technik ist die hohe Empfindlichkeit von Zeitabweichungen des Messsystems.

Die Entwicklung digitaler Signalaufbereitungen hat auch für die Messtechnik eine deutliche Änderung bewirkt. Es gibt eine Reihe handelsüblicher Softwarepakete, die eine große Bandbreite von Messtechniken anbieten, so dass Benutzer wählen können, welche Methode sie benutzen möchten.

The number of acoustical parameters that need to be measured before the start and after the completion of the improvement task is dependent on the type of improvement that is intended. Reverberation time is a parameter that is always needed, regardless whether the future utilisation of the room is for listening to music or for verbal communication. Reverberation is the fundamental information, since it is an indication of the acoustic response of the room. Occasionally, e. g. in very large halls or in ancient churches, it is necessary to measure the reverberation time in different parts of the room, since it may differ from position to position, depending upon the geometry of the place and the materials covering floors, walls and ceilings in the vicinity of the measuring point. The information obtained on reverberation times in different places must be completed by a geometric study of occurring reflections. This allows for a judgement as to where it is necessary to reinforce the sound and where to place the reflectors.

Already these two acoustical parameters – reverberation and sound reflection – allow for satisfactory acoustic improvement results where a deeper investigation into the overall acoustic conditions of a place is precluded by budget limitations.

#### A5-4.2.1 Measurements in case of new rooms

The purpose of room acoustical measurements is to determine the values of acoustical parameters describing the acoustical space (e. g. to validate or verify the room quality).

As most of the objective acoustical parameters ( $T$ ,  $EDT$ ,  $C_{80}$ , etc.) can be determined with impulse response measurements, most of the methods seek to determine a simple, non-directional impulse response of the room. Other parameters include also directivity information ( $LE$ ,  $LEF$ ,  $IACC$ , etc.) and thus their measurement is more complex: A directional impulse response has to be measured.

There are several techniques to measure impulse response and several ways to group them.

Impulse response can be measured directly, or it can be determined indirectly from the measured transfer function by means of inverse Fourier-transformation.

We can also distinguish the methods based on the type of the excitation used. The excitation can be narrow-band or wide-band. A narrow-band excitation is typically a sine or a swept-sine, whilst wide-band excitation can be white / pink noise, or also an impulse (clap, gun shot, etc.).

We can also group the measurements as frequency-domain or time-domain measurements.

One of the most up-to-date and most commonly used techniques is using pseudo-random signals (e. g. maximum length sequences) as excitation. The impulse response is calculated as a cross-correlation of the known excitation and the response signal. The disadvantage of this technique is its high sensitivity on the time-variance of the measured system.

The development of digital signal processing made a significant change in the measurement techniques as well. There are many commercially available software packages, all offering a wide variety of measurement techniques so the user can select whichever method he wants to use.

**A5-4.3 Modellerstellung**

Im Fall vorhandener Räume ist der nächste Schritt die Errichtung eines Modells der Raumbedingungen, auf den gemessenen Parametern basierend. Im Fall sehr anspruchsvoller akustischer Räume (Auditorien, ...) muss auch bei Abwesenheit von Messergebnissen ein Modell entwickelt werden. In diesem Fall werden nach den ersten Konstruktions- und Installationsschritten neue Messungen vorgenommen und ein neues Modell entwickelt, um die Ergebnisse zu verbessern oder anzupassen.

Das modernste Instrument zur Überprüfung und Vorhersage erwartbarer akustischer Qualitäten einer geplanten Halle, eines Raumes oder jedweden offenen oder umschlossenen Bereiches ist eine computergestützte Modellbildung und Analyse. Für den Zweck sind verschiedene Softwarepakete auf dem Markt verfügbar. Sie alle beruhen auf den Prinzipien geometrischer Akustik.

Die Grundprinzipien geometrischer Akustik sind dieselben wie für die Optik. Die Schallausbreitung wird als Ausbreitung von Strahlen beschrieben (oder Schallstrahlen) im Gegensatz zu Wellen. Die sich ausbreitenden Strahlen werden an Zwischenschichten von Materialien mit unterschiedlichen Brechungseigenschaften gebrochen. Während der Vorhersage werden die Ausbreitungswege der Strahlen von der Quelle zum Empfänger verfolgt, als Ergebnisse werden gerichtete Impulsantworten, Werte der akustischen Parameter an einzelnen Orten oder Verteilungen über Flächen bestimmt.

Neben der Vorhersage akustischer Eigenschaften eines Raumes kann diese Software auch elektroakustische Systeme überprüfen, wenn die Richtwirkung der Quelle und ihre anderen Eigenschaften bekannt sind.

Die Ergebnisse dieser Vorhersagen können auch für Schallsimulationen in Räumen benutzt werden (Auralisation).

Für die akustische Analyse muss das so genannte geometrische Modell der Umschließung oder des offenen Bereiches geschaffen werden. Das geometrische Modell ist ein vereinfachtes dreidimensionales Modell des untersuchten Bereiches, welches alle Begrenzungsflächen enthält (Wände, Böden, Schallreflektoren, Diffusoren, Stühle, usw.) und ihre akustischen Eigenschaften (Absorptionskoeffizient, Diffusionskoeffizient).

Zur Auswahl der zuträglichen akustischen Eigenschaften dieser Oberflächen können entweder die Ergebnisse von Messungen oder Nachschlagewerke benutzt werden.

Bezüglich des Modellansatzes gibt es einige offene Fragen.

Die Bildung eines Modells für das Auditorium oder das Orchester oder den Chor auf der Bühne ist nicht leicht, da deren Absorptions- und Diffusionskoeffizienten auf der Personenzahl, der Kleidung, usw. beruhen.

Das andere heiße Thema bei geometrischer Akustik ist die Bildung eines Modells für die Diffusion und die Brechung.

Abhängig vom verfügbaren Budget kann eine komplizierte Modellbildung mit handelsüblicher Software erfolgen oder eine einfache, die bloß auf beruflicher Erfahrung beruht.

**A5-4.4 Akustische Konditionierung**

Einige praktische Fragen im Zusammenhang mit der Planung akustischer Verbesserung bestehender Räume sind:

- Der Raum kann Bereiche mit hohem Nachhall und Bereiche mit einem schwachen akustischen Signal aufweisen. Die Behandlung dieser verschiedenen Bereiche muss offenbar sehr verschieden sein.

**A5-4.3 Modelling**

In case of existing rooms, the next step is the modelling of the room conditions based on the measured parameters. In case of high performance acoustic rooms (auditoria, ...), the modelling must be done even if there are no measurements available. In this case, after the first construction and installation tasks, new measurements and new models are made in order to improve or adjust the results.

The most up-to-date tool for verifying and predicting the expected acoustic qualities of the designed hall, room or any space closed or open is the computer-aided modelling and analysis. For this purpose, several software packages are available commercially. They are based on the principles of geometrical acoustics.

The basic principles of geometrical acoustics are the same as for optics. The propagation of sound is described as propagation of rays (or sound beams), rather than waves. The propagating rays are refracted at the interfaces between materials of differing refracting properties. During prediction, the paths of rays are traced from the sources to the receiver points; as results, directional impulse responses, values of acoustical parameters in points or as distributions over planes are determined.

Besides predicting the room acoustical parameters, this software is also able to verify the electro-acoustic systems, if the proper source directivity and its other characteristics are known.

The results of the predictions can be used for sound simulation in rooms (auralisation) as well.

For the acoustic analyses, the so-called geometrical model of the enclosure or open space has to be created. The geometrical model is a simplified three-dimensional model of the examined space containing all the surfaces (walls, floors, sound reflectors, diffusers, chairs, etc.) and their acoustical properties (absorption coefficient, diffusion coefficient).

For selecting the appropriate acoustical properties of the surfaces, either results of measurements or look-up tables can be used.

There are several open questions regarding the modelling approaches.

Modelling the audience or the orchestra or choir on the stage is not easy, since their absorption and diffusion coefficients depend on their number, clothing, etc.

The other hot topic of geometrical acoustics is the modelling of diffusion and diffraction.

Depending on the available budget, a complicated modelling with commercial software could be executed, or a simpler one, only based on professional experience.

**A5-4.4 Acoustic conditioning**

Some practical questions with regard to the design of an acoustical improvement in case of existing rooms are:

- The room can possess zones with high reverberation and zones with a very weak acoustical signal. The treatment of these different zones must obviously be very different.

- Nachhallzeit wird am besten durch die Erhöhung der Absorption vermindert. Dafür gibt es Gleichungen. Aus ästhetischen Gründen, z. B. in alten Kirchen, kann die Absorption häufig nur seitlich angebracht werden. Dann muss sie für alle reflektierenden Flächen gelten, möglicherweise sogar für Türen und Fenster.
- Andere übliche Lösungen bestehen in Bezügen für Stühle, Auslegung von Teppichen oder absorbierende abgehängte Decken.
- Eine Verstärkung der Akustik ist komplizierter. In manchen Fällen ist es erforderlich, elektroakustische Verstärkung zu benutzen. Wo dies nicht möglich ist, sollten die folgenden Überlegungen angestellt werden:
  - = Der Bühnenboden kann wie eine hölzerne Schachtel ausgeführt werden. Er wirkt dann als Resonanzboden, was gelegentlich zu Problemen führt.
  - = Es kann nützlich sein, akustisch dichte, stark reflektierende Flächen hinter dem Sprecher anzubringen, um dessen Stimme zu verstärken.
  - = Die Installation von „akustischen Flächen“ oder Reflektoren verstärkt den Schall und hilft bei seiner Ausbreitung und Diffusion. Es kann erforderlich sein, jedwede Hohlräume (Türen, innere Gewölbe, z. B. bei Kirchen, usw.) abzudecken: Schiebetüren oder ähnliches können hier sehr nützlich sein. Sie können verborgen werden, wenn die akustische Verbesserung solcher konkaven Flächen zeitweise nicht benötigt wird.
  - = Um die Schalldiffusion zu verbessern, ist es möglich, die Geometrie des Daches zu brechen, wenn das Dach eben ist. Kubische Geometrie wird nicht empfohlen.
  - = Eine Möglichkeit, das Verhältnis Volumen – Anzahl der Hörer zu reduzieren, ist der Einbau abgehängter Decken, der das Volumen vermindert. Diese Lösung bietet sich auch an, wenn Teile der Gebäudeausrüstung, z. B. Luftkanäle und Beleuchtungsdrähte verdeckt werden müssen.
  - = Da das Geräusch der Lüftungsanlage die gewünschte akustische Verständigung beeinträchtigen kann, kann es gelegentlich ratsam sein, das Raumklima aufzubereiten (kühl oder warm), bevor die akustische Nutzung beginnt.
- Reverberation time is best diminished by increasing absorption. Equations to calculate this do exist. for aesthetic reasons, e. g. in old churches, the absorption may frequently only be positioned laterally. It must then be applied to all reflecting surfaces, possibly even including doors and windows.
- Other habitual solutions exist in draping chairs, installing carpets or absorbent suspended ceilings.
- An acoustic amplification is more complicated. Sometimes, it is necessary to use electro-acoustic reinforcement. Where this is not possible, the following considerations should be taken into account:
  - = The stage floor can be made as a booth of wood. It than acts as a resonant box, which can occasionally cause problems
  - = It can be useful to have acoustically impenetrable, strongly reflecting surfaces behind the speaker, in order to reinforce the voice.
  - = The installation of “acoustical shelves” or reflectors reinforces the sound, helping its propagation and diffusion. It can be necessary to cover any hollow spaces (doors, interior arches in case of churches, etc.): Sliding doors and similar devices can be very useful for this. They can be hidden when the acoustical improvement of concave surfaces is temporarily not required.
  - = To improve the sound diffusion, it is possible to break the geometry of the roof is case it is plane. Cubic geometry is not recommended.
  - = A way to reduce the relation volume – number of listeners is the application of a suspended ceiling bringing the volume down. This condition comes also to hand when parts of the building equipment, e. g. air ducts and lightning wires, need to be covered.
  - = Since the noise of air-conditioning can disturb the desired acoustical communication effect, it can occasionally be advised to condition the room ambience (cool or warm) before the acoustical utilisation starts.

**A5-5 Symbole und Einheiten****A5-5 Symbols and units**

Symbol	Größe Quantity	Einheit Unit	Seite Page
$\bar{\alpha}_{Sab}$	arithmetisches Mittel aller Absorptionskoeffizienten für alle Flächen arithmetic mean of all absorption coefficients for all surfaces		8
$\alpha$	Absorptionskoeffizient, vor Ort gemessen oder berechnet absorption coefficient measured or calculated in-situ		8
$\alpha_{SAB}$	Absorptionskoeffizient, Laborwert absorption coefficient measured in laboratory		8
$\alpha_S$	Absorptionskoeffizient, Laborwert absorption coefficient measured in laboratory		8
$T_{Eyr}$	Nachhallzeit gemäß Eyring reverberation time defined by Eyring	s	8
$L_{S,1}$	Stimmpegel eines Sprechers im Referenzabstand ( $R_0 = 1$ m) speaker's voice level at the reference distance ( $R_0 = 1$ m)	dB	10
$L_{r,L}$	Stimmpegel eines Sprechers an der Hörerposition speaker's voice level at the listener position	dB	10
$r_0$	Referenzabstand 1 m reference distance 1 m	m	10
$L_D$	Schalldruckpegel des direkten Feldes sound pressure levels of the direct field	dB	12, 13
$L_R$	Schalldruckpegel des Hallfeldes sound pressure levels of the reverberation field	dB	12, 13
$Q$	Richtungsfaktor der Schallquelle factor of directivity of the sound source		13, 14, 15, 44
$R$	Raumkonstante constant of the room	m <sup>2</sup>	13, 14, 44
$L_{P(indoor)}$	Schalldruckpegel in einem Raum sound pressure levels in the room	dB	14
$L_{P(direct)}$	Schalldruckpegel des direkten Feldes sound pressure levels of the direct field	dB	14

Symbol	Größe Quantity	Einheit Unit	Seite Page
$L_{P(\text{reflected})}$	Schalldruckpegel, von den Grenzflächen reflektiert sound pressure levels reflected from the limiting surfaces	dB	14
$\alpha_S$	Schallabsorptionskoeffizient einer Oberfläche sound absorption coefficient of a surface		32, 33
$k_0$	Faktor factor		32
$\alpha$	Schallabsorptionskoeffizient sound absorption coefficient		16, 17
$\lambda$	Wellenlänge wavelength	m	62
$\alpha^*$	Schallabsorptionskoeffizient der Decke (und möglicherweise Boden) sound absorption coefficient of ceiling (and possibly floor)		15
$\alpha_c$	Schallabsorptionskoeffizient einer Decke sound absorption coefficient of ceiling		15
$\alpha_f$	Schallabsorptionskoeffizient eines Bodens sound absorption coefficient of floor		15
$\alpha_L$	Dämpfungskoeffizient der Luftschallabsorption pro m attenuation coefficient of airborne sound absorption per m		15
$\Delta t$	Zeitspanne span of time	s	5
A	äquivalente Absorptionsfläche equivalent absorption area	m <sup>2</sup>	8, 13, 30, 32
AI	Artikulationsindex articulation index		
$A_0$	äquivalente Absorptionsfläche ohne Absorptionsmaterial equivalent absorption area without absorption material	m <sup>2</sup>	32
c	Schallgeschwindigkeit speed of sound	m/s	7, 8
$C_{80}$	Verhältnis in dB zwischen der Energie der Impulsantwort vor 80 ms und der Energie vom späteren Anteil nach 80 ms ratio in dB between the energy of the impulse response before 80 ms and the energy of the later part after 80 ms	dB	25
$C_{\text{exp}}$	erwartetes C expected C		25
$C_s$	Klarheit in 1 m Abstand clarity at 1 m distance	dB	24
$C_{\text{tr}}$	Anpassungswert für A-bewerteten städtischen Straßenverkehrslärm adaptation value for A-weighted urban traffic noise	dB	29
D	Abstand von der Quelle zum Aufnahmepunkt distance source – receiving point	m	16
$DL_2$	Abnahme des Schalldrucks pro Entfernungsverdoppelung zur Quelle decrease of sound pressure per doubling of distance from the sound source	dB	17
$d_{\text{min}}$	Mindestabstand minimum distance	m	7
$D_{nTA, \text{tr}}$	bewertete standardisierte Schallpegeldifferenz weighted standardised sound level difference	dB	29
$D_{nTw}$	bewertete standardisierte Schallpegeldifferenz weighted standardised sound level difference	dB	29
$E(0) 1\text{m}$	Messung der Direktenergie in 1 m Abstand direct energy measurement in 1 m distance	Nm ?	26
$E(\text{dir})$	direkter Schall direct sound	Nm	27
$EDT_{\text{pod}}$	frühe Abfallzeit im Bühnenbereich Early Decay Time in the stage area	s	26, 27
f	Frequenz frequency	Hz	63
h	Höhe des Absorbers über dem Grund height of absorber above ground	m	15, 32
H	Höhe des Raumes height of the room	m	16
h	Höhe einer Quelle height of the source	M	16
IACC	Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient, bestimmt für den Zeitraum zwischen 0 und 80 ms interaural cross-correlation coefficient determined for a time period of 0 ms to 80 ms		24, 25
L	Verhältnis zwischen der gesamten Impulsantwortenergie und der Energie des direkten Schalls, gemessen in 10 m Abstand in dB ratio in dB between the total impulse response energy and the energy of the direct sound as measured in 10 m distance	dB	25, 26
$L_{50}$	Pegel, der mehr als 50 % der Zeit vorherrscht, gemessen in einem Raum zwischen 9.00 und 18.00 Uhr, bei abgestellter Gebäudetechnik und bei Außengeräuschen level prevailing more than 50% of the time, measured in the room between 9.00 h and 18.00 h, whilst the building equipment does not work and the noise coming from outside	dB(A)	29, 30, 43
$L_{\text{Aeq}}$	A-bewerteter äquivalenter Schalldruckpegel A-weighted equivalent sound pressure level	s	57

Symbol	Größe Quantity	Einheit Unit	Seite Page
LEF	seitlicher Energieanteil Lateral Energy Fraction		24
$L_{exp}$	erwartetes L expected L	dB	26
$L_{max}$	höchster Schallpegel maximum noise level	dB	29
$L_P$	Schalldruckpegel sound pressure level	dB	14, 16, 44
$L_W$	Schalleistungspegel sound power level	dB	14, 16, 44
NBC			59
PI	Privacy Index		43
q	durchschnittliche Dichte von Diffusoren average density of diffusers		38
r	Abstand in m vom betrachteten Punktes zur Schallquelle distance in m of the point considered to the sound source	m	10, 13, 14, 44
r	Reflexionskoeffizient refelction coefficient		16
$r_c$	Reflexionskoeffizient Decke reflection coefficient ceiling		16
$r_f$	Reflexionskoeffizient Boden reflection coefficient floor		16
$R'w$	scheinbares bewertetes Schalldämmmaß einschließlich der Nebenwegsübertragungen apparent weighted sound reduction index including bypass transmission	dB	29
S	Fläche aller Oberflächen area of all surfaces	m <sup>2</sup>	8, 13,
S	Oberfläche surface	m <sup>2</sup>	30, 31, 32, 33, 38
SIL	Sprachstörpegel Speech Interference Level	dB	12
ST	Verhältnis zwischen der Energie, die zurück zur Bühne reflektiert wird und der Direkt-schallenergie ratio between energy sent back to the platform and the energy of the direct sound	dB	26
ST1 (ST <sub>early</sub> )	Integration der frühen Reflexionen in 100 ms integration of early reflections of 100 ms	dB	26
ST1 <sub>exp</sub>	erwartetes ST1 expected ST1	dB	27
ST2	Integration der frühen Reflexionen in 200 ms integration of early reflections in 200 ms	dB	26
ST2 <sub>exp</sub>	erwartetes ST2 expected ST2	dB	27
ST <sub>late</sub>	Pegel der späten Schallenergie level of the late energy	dB	27
ST <sub>total</sub>	Integration der frühen Reflexionen bis $\infty$ (1 Sekunde) integration of early reflections up to $\infty$ (1 second)	dB	26
T	Nachhallzeit reverberation time	s	5, 6, 7, 9, 12, 30, 32, 43, 58, 59
t	Zeit time	s	25
$T_m$	Durchschnittswerte der Nachhallzeit (500 Hz – 1000 Hz) average values of reverberation time (500 Hz – 1000 Hz)	s	57, 58
$T_0$	best möglicher Nachhall in den Mittenfrequenzen optimum reverberation time in the mid-frequencies	s	49
$T_r$	durchschnittliche Nachhallzeit in den Oktaven 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz mean reverberation time of octaves 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz	s	60
$T_{Sab}$	Nachhallzeit gemäß Sabine-Formel reverberation time defined by Sabine	s	8, 43
V	Raumvolumen volume of the room	m <sup>3</sup>	7, 8, 26, 27, 30, 38, 39, 43, 57, 58, 59, 60
$V_0$	Bezugsraumvolumen 100 m <sup>3</sup> reference room volume 100 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	58

A5-6	Normen und Literatur	A5-6	Standards and literature
ISO 3382-2:	Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms		
ISO 3741:	Sound power level: Precision methods for broad band sources in reverberation rooms		
ISO 3745:	Sound power level: Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms		
ISO 354:	Measurement of sound absorption in a reverberation room		
ISO 9921:	Assessment of speech communication		
ISO 14257:	Acoustics – Measurement and parametric description of spatial sound distribution curves in workrooms for evaluation of their acoustical performance		
EN ISO 11690:	Directives for the design of low-noise-machinery-equipped workstations		
	Part 1: General principles, February 1997		
	Part 2: Noise reduction measures, February 1997		
	Part 3: Sound propagation and pre-calculation in workstations, January 1999		
EN 12354-6:	Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 6: Sound absorption in enclosed spaces		
CEI 60268-16:	Equipements pour systèmes électroacoustiques – Partie 16: Evaluation objective de l'intelligibilité de la parole au moyen de l'indice de transmission de la parole		
VDI 3760:	Computation and measurement of sound propagation in workrooms		
	Calificación de la cámara seminecoica del laboratorio de acústica y vibraciones de la ETS Ingenieros Industriales de Valladolid. San Juan Blanco Manuel et al. Tecnicacústica 1993		
	Caracterización actualizada de la cámara reverberante del Instituto de Acústica. De la Colina, C et al. Tecnicacústica 2000		
	The Master Handbook of Acoustics, F. Alton Everest		
	Acoustique des salles et sonorisation, Jacques Jouhaneau, 2003		
	Guide pratique de l'acoustique des locaux scolaire, M. Meisser , 1987		
	Assessment of sound-field parameter, differences in studio listening conditions. Gerhard Spikofsky; EBU Technical Review, September 2000		
	Estudio del acondicionamiento y aislamiento acústico de los estudios de grabación en Gran Canaria. Tecnicacústica 1995		
	Technischer Lärmschutz, Werner Schirmer – VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996		
	Unfallverhütungsvorschrift – UVV Lärm, 1997 (Die UVV Lärm in der Fassung 1990 entspricht inhaltlich der EG-Richtlinie 86/188/EWG "Richtlinie des Rates über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Lärm am Arbeitsplatz")		
	Beranek, L.L.: "Concert Halls and Opera Houses. Music, Acoustics and Architecture". Springer-Verlag New York 2004.(Second Edition)		
	Jordan, V.L.:Acoustical Design of Concert Halls and Theatres. Applied Science Publ., London 1980		
	Lord, P. , Templeton, D.: "The Architecture of Sound". The Architectural Press Limited, London 1986		
	Gade, A.C.: "Acoustical Survey of Eleven European Concert Halls – a basis for discussion of halls in Denmark" The Acoustics Lab. TU Denmark, Report No. 44., 1989,		
	Gade A.C.: "Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. II: Field Experiments and Synthesis of Results". Acustica 70 (2) 1990,		
	Barron, M. , Lee, L.-J.: "Energy relations in concert auditoriums. I". J. Acoust. Soc. Am. 84 1988, p. 618.		
	Bradley, J.S.: "Experience with new auditorium acoustic measurements". J. Acoust. Soc. Am. 73 1983, p. 2051.		
	Tachibana, H. et al.: "Acoustic survey of auditoriums in Europe and Japan". J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 10 1989, p. 73.		
	Hidaka, T.- Okano, T.- Beranek, L.L. J. Acoust. Soc. America 92, 2469. 1992.		
	Hidaka, T.- Beranek, L.L.- Okano, T.: J. Acoust. Soc. America 98, 988. 1995.		
	ISO 3382: "Acoustics - Measurement of reverberation time in Auditoria". 1975.		
	Jordan V.L.: "Room Acoustics and Architectural Acoustics Development in recent years". Appl. Acoustics 2 1969, p. 59.		
	Kürer, R.: "Zur Gewinnung von Einzelkriterien bei Impulsmessung in der Raumakustik". Acustica 21 1969, p. 370.		
	Reichardt, W. , Alim, D.A. , Schmidt, W.: "Definition und Messgrundlagen eines objektiven Masses zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikaarbeitungen" <sup>11</sup> . Acustica 32 19'35, p. 126.		
	Lehmann, P. , Wilkens, H.: "Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien". Acustica 45 1980, p. 256.		
	Barron, M. , Marshall, A.H.: "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls". J. Sound Vib. 77 1981, p. 211.		
	Schroeder, M.R.: "New method of measuring reverberation time". J. Acoust. Soc. Am. 37 1965, p. 409.		
	Blauert, J. , Lindemann, W.: "Auditory spaciousness: Some further psychoacoustic analyses". J. Acoust. Soc. Am. 80 1986, p. 533.		
	Morimoto, M. , Posselt, C.: "Contribution of reverberation to auditory spaciousness in concert halls". J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 10 1989, p. 87.		
	Gade A.C.: "Investigations of Musicians' Room Acoustic conditions in concert Halls. I: Methods and Laboratory Experiments". Acustica 70 (1) 1989,		
	Lehmann, P.: "Über die Ermittlung raumakustischer Kriterien und deren Zusammenhang mit subjektiven Beurteilungen der Hörsamkeit". Dissertation, T.U. Berlin 1976		
	Bradley, J.S. , Halliwell, R.E.: "Accuracy and reproducibility of auditorium acoustics measures". Proceedings of The Institute of Acoustics 10 1988, p. 399.		
	Izenour, G.C.: "Theater Design". McGraw-Hill, New York 1977.		
	Burd, A.N.: "St. David's Hall, Cardiff". Proceedings of The Institute of Acoustics, David Hume Tower, Univ. of Edinburgh, September 1982.		
	Barron, M.: "Auditorium Acoustics and Architectural Design" John Wiley, London 1990		
	Forsyth, M.: "Buildings for Music". Cambridge University Press, Cambridge 1985.		
	Parkin, P.H. , Scholes, W.E. , Derbyshire, A.G.: "The reverberation times of ten British concert halls". Acustica 2 1952, p. 97.		
	Barron, M.: "Subjective Study of British Symphony Concert Halls". Acustica 66 1988, p. 1.		
	Parkin, P.H. et al.: "The acoustics of The Royal Festival Hall, London". Acustica 3 1953,		
	Barron, M.: "The Royal Festival Hall Acoustics Revisited".Appl. Acoustics 24 1988, p. 255.		
	Thompson, N.: "Nottingham Concert Hall and Dergate Centre Northampton". Proceedings of The Institute of Acoustics, David Hume Tower, Univ. of Edinburgh, September 1982.		
	Müller, H.A. , Opitz, U.: "Raumakustische Gestaltung". ARCUS 1986.1 p. 5.		
	Rollenhagen, E.: "Architektur und Akustik des Konzertsäles im Gasteig Kulturzentrum, München". ARCUS 1986.1 p. 14.		
	Müller, H.A.: "Room acoustical criteria: prediction and measurement. Proceedings of 12. ICA, Toronto 1986, Paper E4-11.		

Cremer, L., Keidel, L., Müller, H.A.: "Die Akustischen Eigenschaften des großen und des mittleren Saales der neuen Liederhalle in Stuttgart". *Acustica* 6 1956, p. 466.

Tarnóczy, T.-Kotschy, A.: *Acoustical Evaluation of Music Halls and Opera Houses*. ÉTK, Budapest 1971.

*Acústica Arquitectónica y Urbanística*. J. Linares, UPV, 1996.

Absorptionscharakteristika verschiedener Elemente		Absorption characteristics of different elements					
Absorptionskoeffizienten verschiedener Elemente		Absorption coefficients of different elements					
		Frequenzen (Hz) Frequencies (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mauerwerk und Putze <i>Masonry and plasters</i>	geglätteter oder gestrichener Beton <i>smoothened or painted concrete</i>	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,07
	raue Ziegel <i>rough brick</i>	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
	gestrichene Ziegel <i>painted brick</i>	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
	dünnere Putz auf schwerer Wand <i>thin plaster on heavy wall</i>	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
	raue Bausteine <i>rough building stone</i>	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
	gestrichener Putz <i>painted plaster</i>	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Bodenbeläge <i>Floor coverages</i>	Plastikfliesen <i>plastic tiles</i>	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
	Linoleum auf Beton <i>linoleum on concrete</i>	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
	Marmor <i>marble</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Teppich <i>carpet</i>	0,02	0,04	0,06	0,20	0,30	0,35
	Bodenteppich (7 bis 10 mm) <i>floor carpet (7 to 10 mm)</i>	0,04	0,07	0,12	0,30	0,50	0,80
	Auslegware auf einer Unterlage <i>wall-to-wall carpet on an underlayer</i>	0,10	0,20	0,50	0,60	0,80	0,80
	geklebtes Parkett <i>glued parquet</i>	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07
Verschiedenes <i>Diverse</i>	Parkett auf hölzerner Unterlage <i>parquet on wooden underlayer</i>	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,07
	Spiegel vor einer Wand <i>mirror in front of a wall</i>	0,12	0,10	0,05	0,04	0,02	0,02
	lackiertes Holz <i>lacquered wood</i>	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	Wand mit Marmorbelag <i>marble placed on walls</i>	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
	Tür gleichmäßig lackiert <i>door evenly lacquered</i>	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
	Tür flach <i>door flat</i>	0,30	0,20	0,20	0,10	0,07	0,04
	Regale ohne Bücher vor einer Wand <i>boards without books in front of a wall</i>	0,30	0,40	0,40	0,30	0,30	0,20
	Fenster mit Doppelverglasung <i>windows with double glazing</i>	0,28	0,20	0,10	0,06	0,03	0,02
	Einfachglas <i>ordinary glass</i>	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
	Sperrholz zwischen 5 mm und 50 mm an einer Wand <i>plywood of 5 mm to 50 mm on a wall</i>	0,47	0,34	0,30	0,11	0,08	0,08
	Gipsschicht von 10 mm bis 25 mm an einer Wand <i>gypsum layer of 10 mm to 25 mm on a wall</i>	0,27	0,16	0,10	0,08	0,11	0,12
Presskork <i>pressed cork</i>	0,15	0,26	0,22	0,22	0,20	0,20	
50 mm Audioschaum <i>50 mm audio foam</i>	0,15	0,27	0,63	0,91	1,03	1,06	
Tapeten und Vorhänge <i>Wall papers and curtains</i>	Vorhang vor eine Wand <i>curtain against a wall</i>	0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,44
	Velourvorhang <i>velour curtain</i>	0,10	0,30	0,50	0,80	0,75	0,65
	Raufasertapete <i>roughed wall paper</i>	0,20	0,35	0,55	0,70	0,65	0,60
	Baumwollvorhang mit festen Falten <i>cotton curtain with fixed folds</i>	0,10	0,38	0,50	0,85	0,82	0,67

		Frequenzen (Hz) Frequencies (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Hörer <i>Listener</i>	sitzender Zuschauer <i>sitting spectator</i>	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
	Hörer <i>listener</i>	0,57	0,70	0,82	0,92	0,93	0,90
	Hörer auf bezogenem Sitz <i>listener on covered seat</i>	0,60	0,80	0,90	0,95	0,92	0,90
	Hörer auf hölzernem Sitz <i>listener on wooden seat</i>	0,23	0,40	0,80	0,90	0,90	0,87
Sitze (zwischen 1,5 und 2 pro m <sup>2</sup> ) <i>Seats (between 1,5 and 2 per m<sup>2</sup>)</i>	hölderne Sitze <i>wooden seats</i>	0,11	0,12	0,13	0,16	0,15	0,14
	gepolsterte hölderne Sitze <i>upholstered wooden seats</i>	0,18	0,28	0,30	0,30	0,28	0,27
	Plastiksitze <i>plastic seats</i>	0,37	0,44	0,52	0,50	0,48	0,45
	Ledersitze <i>leather seats</i>	0,40	0,49	0,55	0,56	0,54	0,50
	Sitze mit einfacher Polsterung <i>seats with simple upholstery</i>	0,43	0,54	0,62	0,70	0,72	0,70
	Sitze mit perforierter Polsterung <i>seats with perforated upholstery</i>	0,50	0,63	0,77	0,87	0,85	0,78
	Sitze gepolstert mit Kunstleder <i>seats upholstered with artificial leather</i>	0,44	0,54	0,60	0,62	0,58	0,50
	Sitze mit dünner Polsterauflage <i>seats with thin upholstered coverage</i>	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70

Äquivalente Absorptionsflächen (m<sup>2</sup>) (siehe DIN 18041, Anhang B, Tabelle B2)

Equivalent absorption areas (m<sup>2</sup>) (see DIN 18041, Annex B, Table B2)

		Frequenzen (Hz) Frequencies (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Personen <i>Persons</i>	0,5 m <sup>2</sup> /sitzende Person auf hölzernem Stuhl <i>0,5 m<sup>2</sup>/sitting person on a wooden chair</i>	0,08	0,16	0,25	0,32	0,33	0,34
	1 m <sup>2</sup> /sitzende Person auf hölzernem Stuhl <i>1 m<sup>2</sup>/sitting person on wooden chair</i>	0,18	0,26	0,55	0,68	0,78	0,78
	6 m <sup>2</sup> /sitzende Person <i>6 m<sup>2</sup>/sitting person</i>	0,12	0,18	0,35	0,56	0,68	0,74
	7 m <sup>2</sup> /stehende Person <i>7 m<sup>2</sup>/standing person</i>	0,12	0,19	0,42	0,66	0,86	0,94
Sitze <i>Seats</i>	hölderner Klappstuhl, nicht besetzt <i>wooden folding chair, not occupied</i>	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
	mit einfachem Tuch bedeckter Stuhl <i>chair covered with simple cloth</i>	0,15	0,25	0,30	0,35	0,40	0,40
	mit einfachem Leder bedeckter Stuhl <i>chair upholstered with simple leather</i>	0,05	0,15	0,20	0,10	0,03	0,03
	Theaterklappstuhl <i>folding theatre chair</i>	0,25	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Verschiedenes <i>Diverse</i>	Musiker mit seinem Instrument (1,1 m <sup>2</sup> /Person) <i>musician with his instrument (1,1 m<sup>2</sup>/person)</i>	0,16	0,42	0,87	1,07	1,04	0,94
	Musiker mit seinem Instrument (2,3 m <sup>2</sup> /Person) <i>musician with his instrument (2,3 m<sup>2</sup>/person)</i>	0,03	0,13	0,43	0,70	0,86	0,99
	Chorsänger <i>singer in a choir</i>	0,15	0,30	0,40	0,45	0,45	0,55
	Schüler in einem Klassenraum mit hölzernem Tisch (3 m <sup>2</sup> /Person) <i>pupil in a classroom with wooden table (3 m<sup>2</sup>/person)</i>	0,14	0,20	0,32	0,54	0,58	0,70

## Haftungsablehnung

Wir erachten die in diesem Dokument gegebene Information als eine gute Praxis- und Branchenanleitung (**Anleitung**). Diese Richtlinie wurde von einer FESI ([www.fesi.eu](http://www.fesi.eu)) Kommission erstellt und ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung korrekt. Obwohl wir zuversichtlich sind, dass die enthaltenen Informationen dem neuesten Stand entsprechen und genau sind, ist dies nur ein Bezugsdokument. Es liegt in der Verantwortung des Nutzers, sein eigenes Wissen um die in dieser Richtlinie angesprochenen Probleme auf dem neuesten Stand zu halten.

Diese Richtlinie soll allgemeinen Zwecken dienen, und ist nicht dazu gedacht, maßgebliche nationale oder internationale Normen, Richtlinien oder (wo zutreffend) gesetzliche Regelungen zu übersteuern. Diese Richtlinie soll keine detaillierten Berechnungen und Einschätzungen vorherrschender physikalischer Bedingungen bei komplexen Bauvorhaben ersetzen.

Diese Richtlinie stellt keine gewerbliche Anweisung dar, und spezielle Fachfragen sollten anerkannten Experten vorgelegt werden. Jedes sich Verlassen auf diese Richtlinie ohne Einholung solchen Rates geschieht absolut auf eigene Gefahr. Wir geben keine irgendwie gearteten Zusicherungen oder Gewährleistungen, ausdrücklich oder dem Sinne nach, bezüglich der Vollständigkeit, Genauigkeit, Verlässlichkeit oder Maßgeblichkeit dieser Richtlinie.

Die Richtlinie wurde ursprünglich in Englisch verfasst. Wir übernehmen keine Verantwortung für irgendwelche Ungenauigkeiten, die in Übersetzungen dieser Richtlinie in andere Sprachen als Englisch enthalten sind.

Die Richtlinie wird kostenlos zur Verfügung gestellt und wir sind daher unter keinen Umständen haftbar für Verluste oder Schäden, einschließlich – ohne jede Einschränkung – indirekter oder Folgeverluste oder –schäden, oder sonstiger Verluste oder Schäden, die aus einem sich Verlassen auf diese Richtlinie herrühren.

Keiner dieser Ausschlüsse oder Beschränkungen zielt jedoch darauf ab, irgendwelche Rechte, die nicht abbedungen werden können, zu begrenzen, oder Haftbarkeiten für Tod oder Personenschäden für Sie auszuschließen oder zu begrenzen, die aus unserer mangelnden Sorgfalt oder anderen Haftungsgründen herrühren, die wir aus gesetzlichen Gründen weder abbedingen noch begrenzen können

## Disclaimer

The information contained in this document is considered by us to be good practice and industry guidance (**Guidance**). The Guidance is provided by a commission of FESI ([www.fesi.eu](http://www.fesi.eu)), and is considered to be correct at the date of publication. Whilst we are confident the information contained within it is up to date and accurate, it is a reference document only. It is your responsibility to ensure your knowledge of the matters discussed in the Guidance is kept up to date.

The Guidance is intended to be used for general purposes only and is not intended to take precedence over appropriate national and international standards, guidelines or laws (where applicable). The Guidance is not intended to replace detailed calculations and assessments of prevailing physical conditions in complicated building assignments.

The Guidance does not constitute professional advice and specific queries should be referred to qualified professionals. Any reliance placed on the Guidance without seeking such advice is strictly at your own risk. We make no representations or warranties of any kind, express or implied, about the completeness, accuracy, reliability or suitability of the Guidance.

The Guidance in its original form is written in English. We accept no responsibility for any inaccuracies contained in any translation of the Guidance in languages other than English.

The Guidance is provided free of charge and as such in no event will we be liable for any loss or damage including, without limitation, indirect or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from any reliance placed on the Guidance.

None of these exclusions or limitations, however, are intended to limit any rights which may not be excluded, nor to exclude or limit liability to you for death or personal injury resulting from our negligence or for other liability which we cannot exclude or limit by law.